

S. Borowik

FILTRY

**filtry
płynów
roboczych**

NT

Dr inż. STANISŁAW BOROWIK

FILTRY PŁYNÓW ROBOCZYCH



WYDAWNICTWA NAUKOWO-TECHNICZNE
WARSZAWA 1974

Opiniodawca

Dr inż. Zbigniew Wański

Redaktor naukowy

Henryk Kunicki

Redaktor techniczny

Jadwiga Pakoca

Okladkę i obwolutę projektowała

Jolanta Kalita

66.067.3

W książce omówiono rodzaje płynów roboczych i wpływ ich czystości na działanie urządzeń płynowych, materiały filtracyjne porowate oraz metody ich badań i regeneracji, układy filtrowania płynów, filtry cieczy i gazów z uwzględnieniem ich budowy oraz wyposażenie filtrów. Omówiono również metody obliczania i badania własności filtracyjnych i wytrzymałościowych filtrów.

Książka jest przeznaczona dla inżynierów zajmujących się zagadnieniami konstrukcji i badań filtrów. Z książki mogą również korzystać pracownicy zakładów przemysłowych, biur projektowych oraz studenci wydziałów mechanicznych wyższych uczelni technicznych.

WSZELKIE PRAWA ZASTRZEŻONE

Printed in Poland

WNT, Warszawa 1974. Wydanie 1. Nakład 2000 + 220 egz. Ark. wyd. 36,3. Ark. druk. 34,75 + wklejki. Format A5. Papier ilustr. kl. V, 70 g. Oddano do składania 5.6.1973. Podpisano do druku w styczniu 1974. Druk ukończono w styczniu 1974.
Symbol 78329/Tw. Cena zł 68.—

Pozn. Zakł. Graf. im. M. Kasprzaka Zam. 5388/73 — D-15-993

SPIS TREŚCI

<i>Przedmowa</i>	7
WSTĘP	9
ROZDZIAŁ 1. Wiadomości podstawowe	15
1.1. Klasyfikacja urządzeń plynowych i wpływ zanieczyszczeń na ich pracę	15
1.2. Płyny robocze	23
1.2.1. Płyn roboczy i jego funkcje	23
1.2.2. Podział płynów roboczych	25
1.2.3. Własności płynów roboczych	30
1.2.4. Wymagania stawiane cieczom roboczym	45
1.3. Zanieczyszczenia płynów roboczych	49
1.3.1. Uwagi ogólne i wymagania dotyczące poziomów zanieczyszczeń	49
1.3.2. Istota i rodzaje zanieczyszczeń	54
1.3.3. Przyczyny i skutki obecności zanieczyszczeń w cieczach roboczych	58
1.3.4. Kształty i wymiary cząstek zanieczyszczeń	65
1.3.5. Zanieczyszczenia naturalne i testowe	74
1.4. Podstawowe określenia i klasyfikacja filtrów płynów roboczych	78
1.5. Niezawodność urządzeń plynowych	96
1.5.1. Uwagi ogólne	96
1.5.2. Wpływ zanieczyszczeń na pracę wzmacniacza hydraulicznego	98
1.5.3. Metoda wyznaczania funkcji niezawodności urządzeń hydraulicznych	101
ROZDZIAŁ 2. Porowate materiały filtracyjne	107
2.1. Zastosowania materiałów filtracyjnych o dużej porowatości	107
2.2. Materiały filtracyjne szczelinowe	111
2.3. Papiery filtracyjne	117
2.3.1. Uwagi wstępne	117
2.3.2. Podstawowe własności papierów filtracyjnych	119
2.3.3. Metodyka badań papierów filtracyjnych	120
2.3.4. Przykładowe charakterystyki papierów filtracyjnych	122
2.3.5. Budowa wkładów filtracyjnych	132
2.4. Porowate materiały spiekane	134
2.4.1. Materiały i wykonanie porowatych materiałów spiekanych	134
2.4.2. Dyskusja kształtu i ułożenia granulek metalowych filtrów spiekanych	142
2.4.3. Struktura metalowych tworzyw spiekanych i budowa wkładów filtracyjnych	146
2.5. Sita filtracyjne	153
2.6. Syntetyczne tworzywa porowate	158

ROZDZIAŁ 3. Układy filtrowania oraz rodzaje i wyposażenie filtrów	164
3.1. Symbole graficzne filtrów i urządzeń pomocniczych	164
3.2. Układy przygotowania płynu i sposoby włączenia filtrów	164
3.2.1. Instalacja pneumatyczna i układy smarowania	164
3.2.2. Instalacja hydrauliczna	181
3.3. Filtry układów pneumatycznych	194
3.3.1. Zasady konstruowania filtrów pneumatycznych	194
3.3.2. Opis konstrukcji filtrów pneumatycznych	199
3.3.3. Zestaw oczyszczania powietrza z cyklonem gazowym	207
3.3.4. Inne konstrukcje filtrów powietrza	211
3.4. Urządzenia do odprowadzania cieczy filtrów pneumatycznych	217
3.5. Filtry układów hydraulicznych	222
3.5.1. Filtry wlewowe	222
3.5.2. Filtry ssawne	224
3.5.3. Filtry splywowe	227
3.5.4. Filtry włączane w linię ciśnieniową	230
3.6. Filtry magnetyczne	239
3.7. Filtry ciekłych metali	246
3.8. Złącza i zawory filtrów	252
3.9. Sygnalizatory stanu zanieczyszczenia wkładu filtracyjnego	264
3.10. Deaerolizatory cieczy roboczych	271
3.10.1. Rozpuszczalność gazów w cieczach	271
3.10.2. Urządzenia do usuwania gazów z cieczy roboczych	274
ROZDZIAŁ 4. Analiza efektywności filtrowania	281
4.1. Analiza efektywności filtrowania mechanicznego	281
4.1.1. Uwagi ogólne	281
4.1.2. Przybliżona charakterystyka odfiltrowania	289
4.1.3. Rozkład zanieczyszczeń w płynie	292
4.1.4. Analiza porów przegrody filtracyjnej	296
4.1.5. Rozkład porów otwartych przegrody filtracyjnej	299
4.1.6. Intensywność dopływu cząstek zanieczyszczeń do przegrody filtracyjnej	302
4.1.7. Przykłady wyznaczania charakterystyki odfiltrowania filtrów cieczy	307
4.2. Wyznaczanie efektywności filtrowania przy użyciu maszyn matematycznych	312
4.2.1. Modelowanie analogowe	312
4.2.2. Wyznaczanie zmian charakterystyki odfiltrowania przy użyciu maszyny cyfrowej	320
4.3. Wyznaczanie czasu filtrowania	325
4.3.1. Wyznaczanie spadku ciśnienia na przegrodzie filtracyjnej	325
4.3.2. Wyznaczanie spadku ciśnienia przy liniowo narastającej ilości zanieczyszczeń	327
4.3.3. Wyznaczanie spadku ciśnienia dla stałej w czasie ilości zanieczyszczeń	328
4.3.4. Obliczanie czasu filtrowania	329
4.4. Filtrowanie magnetyczne	332
4.4.1. Zasada działania filtrów magnetycznych	332
4.4.2. Wyjaśnienie zjawisk fizycznych	334
4.4.3. Wpływ pola magnetycznego na ośrodki ciekłe	341
4.4.4. Trwałość i charakterystyka odfiltrowania	343
4.5. Filtrowanie cieczy z mieszaniami w zbiorniku	345
ROZDZIAŁ 5. Metody i urządzenia badawcze	349
5.1. Klasyfikacja metod badań filtrów i zanieczyszczeń płynów	349

5.2.	Metody wyznaczania efektywności filtrowania na podstawie badań przegrody porowatej	356
5.2.1.	Uwagi ogólne	356
5.2.2.	Podstawy teoretyczne	357
5.2.3.	Metoda pomiaru	361
5.2.4.	Przykładowe wyniki badań	364
5.2.5.	Uwagi i wnioski	367
5.3.	Proste metody laboratoryjne badań filtrów	371
5.3.1.	Uwagi ogólne	371
5.3.2.	Opis stoisk pomiarowych	372
5.3.3.	Dobór koncentracji zanieczyszczeń i metody liczenia	379
5.3.4.	Metody sedymentacyjne	382
5.3.5.	Półautomatyczny analizator cząstek	390
5.4.	Urządzenia skanujące	392
5.4.1.	Optyczne czujniki analizujące	392
5.4.2.	Mikroskopy skanujące	395
5.4.3.	Metody skanowania	396
5.4.4.	Ocena błędów	399
5.5.	Komputerowy analizator obrazu „QUANTIMET 720”	399
5.5.1.	Budowa przyrządu	399
5.5.2.	Własności przyrządu	403
5.6.	Analizatory zanieczyszczeń działające na zasadzie kontrastu elektrycznego	406
5.6.1.	Uwagi ogólne	406
5.6.2.	Zasada kontrastu elektrycznego	408
5.6.3.	Formowanie impulsu napięciowego	414
5.6.4.	Błędy pomiaru	416
5.6.5.	Budowa analizatorów	419
5.6.6.	Eksploatacja analizatorów z czujnikiem konduktometrycznym	425
5.6.7.	Rodzaje analizatorów	430
5.6.8.	Zalety i wady analizatorów	432
5.7.	Metody kolmatacyjne	434
5.7.1.	Uwagi ogólne	434
5.7.2.	Kolmatomierz zmiennego przepływu ze szczeliną prostokątną	436
5.7.3.	Przykład użycia kolmatomierza	440
5.7.4.	Budowa kolmatomierzy	442
5.7.5.	Przyrząd do określania wskaźnika kolmatacji (Siltng Index)	449
5.7.6.	Urządzenie sygnalizujące	454
5.8.	Metoda z wykorzystaniem wzmacniacza hydraulicznego	455
5.9.	Metody izotopowe	458
5.10.	Spektrochemiczna metoda oznaczania zanieczyszczeń	463
ROZDZIAŁ 6. Obliczenia i badania wytrzymałościowe filtrów		468
6.1.	Uwagi wstępne	468
6.2.	Wpływ technologii na własności mechaniczne spieków porowatych	470
6.3.	Obliczenia statyczne i wytrzymałościowe segmentu wysokociśnieniowego filtru talerzowego	472
6.3.1.	Założenia do obliczeń statycznych i wytrzymałościowych	472
6.3.2.	Rozwiązanie schematu dwukrotnie statycznie niewyznaczalnego metodą sił	474
6.3.3.	Obliczenie przemieszczeń δ_{10} , δ_{20} w układzie równań kanonicznych	475
6.3.4.	Obliczenie przemieszczeń δ_{11} , $\delta_{12} = \delta_{21}$ w układzie równań kanonicznych	476

6.3.5.	Obliczenie przemieszczeń δ_{22} w układzie równania kanonicznego metodą sił	484
6.3.6.	Przykład rachunkowy	487
6.4.	Nośność graniczna płyty wysokociśnieniowego filtra talerzowego	488
6.5.	Badania parametrów wytrzymałościowych materiałów filtracyjnych	491
6.5.1.	Metoda badań	491
6.5.2.	Przykładowe wyniki badań	494
6.6.	Metoda określania odkształceń wkładów filtracyjnych	496
6.6.1.	Specyfika pracy wkładów filtracyjnych	496
6.6.2.	Stoisko do badania wytrzymałości wkładów filtracyjnych	498
6.6.3.	Przebieg próby	500
6.6.4.	Wnioski dotyczące wytrzymałości i optymalnych warunków pracy wkładów spiekanych i siatkowych	503
6.7.	Obliczenia obudowy filtrów ciśnieniowych	504
ROZDZIAŁ 7. Regeneracja porowatych wkładów filtracyjnych		507
7.1.	Charakter osadu na filtrze	507
7.2.	Proste metody regeneracji porowatych wkładów filtracyjnych	509
7.3.	Chemiczne sposoby regeneracji filtrów	513
7.4.	Metody regeneracji z wykorzystaniem zjawiska kawitacji	516
7.5.	Urządzenie do regeneracji filtrów Cavitron Ultrasonics	518
7.5.1.	Opis urządzenia	518
7.5.2.	Zespół wibratora	520
7.5.3.	Czujnik amplitudy	522
7.5.4.	Zespół podtrzymujący filtr	525
7.5.5.	Obwód zasilania zespołu wibratora	527
7.5.6.	Układ hydrauliczno-pneumatyczny	529
7.6.	Pełne próby kontrolne wkładów filtracyjnych po regeneracji	533
LITERATURA		536

PRZEDMOWA

Niniejsza praca uwzględnia wyniki najnowszych studiów i badań nad wpływem filtrów i czystości płynów roboczych na niezawodność urządzeń hydraulicznych i pneumatycznych. Jest ona pierwszym podsumowaniem wielu opracowań dla przemysłu wykonanych w Instytucie Automatyki Przemysłowej Politechniki Warszawskiej.

Praca dotyczy głównie zagadnień technicznych związanych z projektowaniem filtrów płynów roboczych i sposobami oceny czystości „wewnętrznej” układów płynowych. Stanowi ona w moim zamierzeniu niezbędne kompendium wiedzy o filtrach, ich działaniu, konstruowaniu i zastosowaniu. Zawiera informacje potrzebne przy wykonywaniu układów w pełni nowoczesnych i powinna stanowić pomoc przy konstruowaniu i użytkowaniu urządzeń płynowych. Ze względu na istniejące luki w dziedzinie terminologii wprowadziłem wiele nowych pojęć, przy czym usystematyzowałem zbiór wiedzy w zakresie obliczeniowym, konstrukcyjnym oraz badawczym, dotyczącym zarówno filtrów cieczy jak i gazów roboczych. Ponieważ temat pracy obejmuje bardzo różnorodne zagadnienia naukowe i techniczne, szczególnie w dziedzinie, która po raz pierwszy znajduje odbicie w ujęciu monograficznym, konsultowałem się z wieloma specjalistami z różnych dziedzin i ośrodkami naukowymi oraz przemysłowymi.

Czuję się w obowiązku złożyć podziękowanie przynajmniej tej części osób, które w znacznym

stopniu przyczyniły się do ulepszenia treści książki. Przede wszystkim prof. H. J. Leśkiewiczowi za wszechstronną pomoc w zakresie analizy i badań filtrów płynów roboczych, prof. A. T. Troskołańskiemu za pomoc w zakresie usystematyzowania pojęć dotyczących zagadnień filtrowania płynów roboczych. Wyrażam głęboką wdzięczność koledze mgr inż. J. Wojnarowi za twórczą współpracę w zakresie rozwiązywania wielu zagadnień związanych z opracowaniem teoretycznym niezawodności urządzeń hydraulicznych oraz badaniami filtrów. Ponadto dziękuję Kolegom z Instytutu Automatyki Przemysłowej za pomoc w prowadzeniu wielu żmudnych badań i obliczeń filtrów cieczy i gazów oraz dr L. Adamowiczowi, dr inż. B. Redmerowi i dr inż. W. Szcześniakowi za współpracę w zakresie rozwiązań teoretycznych, a mgr inż. A. Rogowskiej za pomoc w zakresie analizy czystości cieczy roboczych. Wybitni konstruktorzy mgr inżynierowie: E. Olko, M. Skąpski i R. Kania służyli cenną pomocą w zakresie projektowania filtrów hydraulicznych.

Jestem wdzięczny Opiniodawcy, dr inż. Z. Wańskiemu za cenne uwagi, które przyczyniły się do poprawienia treści książki oraz redaktorowi Henrykowi Kunickiemu za wielki wkład pracy włożony w opracowanie redakcyjne.

AUTOR

Warszawa, marzec 1973

WSTĘP

Jednym z ważniejszych zadań rozwoju gospodarki narodowej jest podwyższenie ekonomicznej efektywności przemysłu. W tej dziedzinie podstawowe znaczenie mają takie zagadnienia, jak: zwiększenie intensywności procesów technologicznych, produkcja aparatury wysokiej jakości, mechanizacja i automatyzacja operacji wytwórczych, transportowych i komunikacyjnych oraz wszelkich innych operacji związanych z zastosowaniem urządzeń technicznych.

Mechanizacja i automatyzacja wielu urządzeń technicznych jest możliwa przez zastosowanie sprzężonych gazów lub cieczy pod ciśnieniem, jako nośników sygnałów sterujących i energii użytecznej. Można łatwo uzasadnić na podstawie obserwacji i analiz rozwoju konstrukcyjnego urządzeń technicznych, że postęp we wszystkich dziedzinach gospodarki związanej z wykorzystaniem maszyn i urządzeń mechanicznych zależy i długo jeszcze będzie zależeć od stopnia wykorzystania w nich konstrukcji płynowych.

I tak przykładowo w dziedzinie maszyn rolniczych i leśnych prymitywne rozwiązania stosowane w wielu krajach do lat 20÷30 XX wieku oparte były wyłącznie na konstrukcjach czysto mechanicznych. Obecny okres wiąże się z wprowadzeniem urządzeń hydraulicznych i pneumatycznych do niemal wszystkich maszyn wykorzystywanych w nawożeniu, uprawie roli i zbiorach. Napędy urządzeń energetycznych i sterowanie większości parametrów technologicznych w uprawie roli, maszyny i urządzenia do zbioru zbóż i roślin okopowych, do wyrębu lasów, do obróbki, transportu i przeróbki płodów rolnych oraz leśnych są coraz częściej wyposażone w elementy i układy płynowe.

Nowoczesne maszyny drogowe i budowlane w olbrzymiej większości opierają się na wykorzystaniu rozwiązań konstrukcyjnych hydraulicznych i pneumatycznych nie tylko w zakresie prostych „siłowych” operacji, lecz także i operacji „subtelnych”, uprzednio wykonywanych wyłącznie rękami ludzi.

Maszyny i urządzenia do obróbki drewna, tworzyw sztucznych, metali i innych materiałów, zarówno w zakresie technologii bezwiórowych, jak i obróbki skrawaniem, przeszły rozwój od kon-

strukcji mechanicznych, napędu i sterowania elektrycznego do napędów i sterowań plynowych.

Komputeryzacja procesów technologicznych stworzyła dodatkowo wielką szansę rozwoju urządzeń elektrohydraulicznych i elektropneumatycznych, wykorzystywanych już obecnie masowo w skali przemysłowej. Szczególnie w zakresie wytwarzania wyrobów w wielkich seriach i wyrobów precyzyjnych zastosowanie urządzeń pneumatycznych i hydraulicznych umożliwiło konstruowanie maszyn stosunkowo tanich, szybko działających i niezawodnych. Możliwości takie zaistniały wskutek zastosowania plynowych elementów pomiarowych sterujących i wykonawczych.

Rozwój w dziedzinie maszyn komunikacyjnych wiąże się jednoznacznie z postępowaniem w dziedzinie sterowania plynowego. Nie ma obecnie nowoczesnych konstrukcji samolotów, statków, samochodów i ciągników, w których by nie wykorzystywano działania układów plynowych. Serwomechanizmy, umożliwiające realizację precyzyjnych i złożonych zadań sterowania parametrami ruchu obiektów komunikacyjnych, są budowane niemal wyłącznie z wykorzystaniem elementów hydraulicznych i pneumatycznych.

Można przytaczać wiele przykładów z innych dziedzin gospodarki i uzasadniać decydującą rolę urządzeń plynowych. Największy postęp w dziedzinie zastosowania urządzeń plynowych zaznacza się obecnie nie tylko w zakresie wyodrębnionych operacji, ale również w rozwiązaniach kompleksowego sterowania. Przy automatycznym wydobywaniu bogactw naturalnych, w kombinatach metalurgicznych, w przemyśle chemicznym, spożywczym, farmaceutycznym i wielu innych wykorzystuje się systemy realizowane przy użyciu techniki plynowej.

Tak wszechstronne i wielokierunkowe zastosowania techniki plynowej stwarzają duże możliwości konstruktorom i producentom urządzeń plynowych, zmuszając jednocześnie użytkowników do podniesienia poziomu wiedzy ogólnej i kultury eksploatacyjnej przy wykorzystaniu takich urządzeń.

Jednym z najważniejszych i nowych zagadnień związanych z tworzeniem i wykorzystaniem urządzeń plynowych jest zapewnienie odpowiedniej czystości tych urządzeń. Chodzi tu nie o czystość „zewnątrzną”, pozornie wpływającą na niezawodność, ale o czystość „wewnętrzną”, mającą decydujący wpływ na stopień i jakość realizacji zadań nakładanych urządzeniom plynowym. Wynika to ze stwierdzonego faktu, że czystość „wewnętrzna” układu plynowego jest miernikiem stałości założonych parametrów technicznych. Tak więc nie tylko stopień zużycia elementów, a zatem i czas pracy układu, lecz także własności statyczne i dynamiczne ulegają pogorszeniu zawsze tam, gdzie nie zapewniono właściwej czystości „wewnętrznej”.

Ilość stosowanych obecnie rodzajów gazów i cieczy, które nazywamy *plynami roboczymi*, jest bardzo duża. Różnią się one między sobą własnościami fizykochemicznymi, wpływającymi na sposób ich eksploatacji i zakres zastosowań. Szczególnie stopień zanieczyszczenia plynów roboczych bezpośrednio wpływa na poprawność działania elementów z nimi współpracujących oraz stanowi podstawowe kryterium oceny danego plynu. Zagadnienia te zostały szczegółowo omówione w książce.

A oto zasadnicze aspekty, które skłaniają do bliższego zainteresowania się tym zagadnieniem. W latach 50-tych, kiedy zastosowanie urządzeń pneumatycznych i hydraulicznych było mniej powszechne, nie zwracano uwagi na czystość plynu roboczego. Stosowano proste elementy uruchamiane ręcznie lub elektromagnetycznie, zajmujące w stanie czynnym jedno z dwu skrajnych położeń. Siły sterujące przewyższały znacznie wartości teoretycznie niezbędne, a ewentualne niedokładności położenia nie miały zasadniczego wpływu na dokładność urządzenia. Oprócz tego stosowane ciśnienia czynnika roboczego (do 100 at w urządzeniach hydraulicznych) nie powodowały jeszcze poważniejszych uszkodzeń elementów uszczelniających lub przesuwnych wbijającymi się w nie cząstkami zanieczyszczeń. Zresztą elementy te były tanie i zamiana uszkodzonych nowymi nie była zbyt kosztowna.

Sytuacja zmieniła się radykalnie po wprowadzeniu zaworów elektrohydraulicznych i innych czułych elementów regulacji przy równoczesnej stałej tendencji do zwiększania nominalnych ciśnień w tych urządzeniach. Dokładność działania tego typu urządzeń zależy w dużej mierze od zapewnienia małych oporów ruchu członów sterujących i wykonawczych, pewnej powtarzalności przesunięć odpowiadających danemu sygnałowi sterującemu oraz stałych wartości oporów hydraulicznych. Wymagania te stają się trudne do spełnienia zwłaszcza w układach wysokociśnieniowych, których sprawność zależy w dużej mierze od zmniejszenia do technologicznie rozsądnego minimum szczelin pomiędzy elementami ruchomymi. W celu zapewnienia odpowiednich własności dynamicznych niejednokrotnie jest niezbędne stosowanie stałych lub zmiennych oporów o bardzo małych wymiarach poprzecznych, poniżej 0,1 mm. Zrozumiałe jest, że wszystko to prowadzi do znacznego wzrostu ceny urządzeń, a co z tym jest związane — do wzrostu wymagań dotyczących ich niezawodności.

W poszukiwaniu typowych przyczyn niesprawności nowoczesnych urządzeń plynowych przeprowadzono wiele badań. Sporządzano statystyczne wykazy najczęstszych uszkodzeń, wyznaczono eksperymentalnie zależność pomiędzy różnymi warunkami eksploatacji i występującymi niesprawnościami. Stwierdzono, że przy-

czynami większości uszkodzeń są zanieczyszczenia w płynach roboczych.

Istnieje, oczywiście, wiele sposobów zabezpieczania urządzeń przed szkodliwym wpływem zanieczyszczeń. Można więc wprowadzić odpowiednio duże siły sterujące, nie dopuszczać — jeżeli jest to możliwe — do stykania się pewnych elementów konstrukcji z zanieczyszczonym płynem roboczym, można wreszcie dokładnie czyścić wszystkie elementy składowe podczas montażu i stosować zamknięty obieg „czystego” czynnika w hermetycznym układzie. Jednak najpewniejszym zabezpieczeniem układu jest zastosowanie odpowiednio dobranych urządzeń oddzielających cząstki zanieczyszczeń płynu roboczego, zwanych *filtrami*.

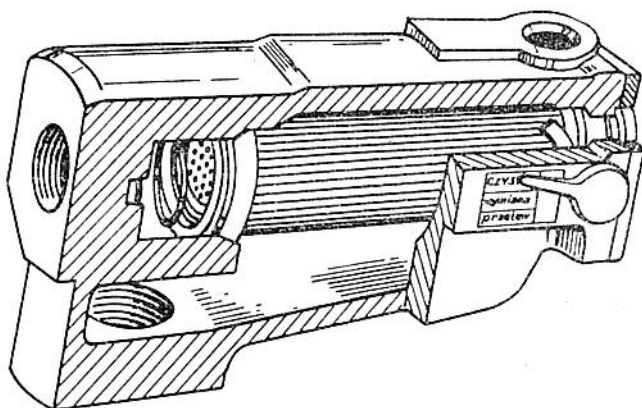
Ilościowym wskaźnikiem, wyrażającym niezawodność eksploatacyjną urządzeń płynowych jest zawartość zanieczyszczeń w płynie roboczym, a konstrukcyjnym zabezpieczeniem czystości płynów roboczych jest wyposażenie układu płynowego w filtry płynów roboczych.

Stosowana w praktyce ilość typów i odmian konstrukcyjnych filtrów jest olbrzymia. Obok *filtrów ogólnego przeznaczenia* wprowadza się *filtry specjalne*, których celem jest zabezpieczanie określonego elementu względnie nietypowe przeznaczenie — wskazywanie stopnia zużycia danego urządzenia itp. Ta różnorodność filtrów oraz funkcji jakie one spełniają zobowiązuje konstruktora do dokładnego określenia wymagań, jakie filtr ma spełniać, oraz do wyboru filtru optymalnego, który przy najniższej cenie zapewni wystarczającą dokładność oczyszczania. Niejednokrotnie może się okazać, że nie ma na rynku filtru spełniającego postawione wymagania i wówczas jest niezbędne wykonanie nowej konstrukcji.

Postęp techniczny w budowie urządzeń płynowych w sposób wielokierunkowy prowadzi do rozwoju środków oczyszczania płynów roboczych, przy czym ciągłość tego postępu jest uwarunkowana głównie rozwojem technologii. Polega on więc na produkowaniu środków filtrujących łączących w sobie małe opory przepływu, długi czas pracy i wysoką efektywność oraz odpowiednią jakością filtrowania. Dodatkowymi zaletami nowych konstrukcji filtrów są urządzenia pomocnicze, ułatwiające eksploatację.

Przykładem nowej konstrukcji filtru cieczy jest *filtr typu Tell Tale* (rys. W. 1.). Filtr jest wyposażony we wskaźnik zanieczyszczeń Tell Tale, który stale informuje o warunkach filtrowania. Zależnie od pozycji informuje o tym, czy filtr jest czysty (clean), czy potrzebuje czyszczenia lub wymiany (needs cleaning) oraz czy następuje przelew (by-passing). Może on być umieszczony w dowolnym miejscu obudowy. Metalowa konstrukcja zapewnia dużą wytrzymałość w warunkach przemysłowych. Regulacja spadku ciśnienia jest realizowana za pomocą sprężyny, która może być wy-

mieniona bez demontażu filtru. Jedna sprężyna limituje spadek ciśnienia, ustawia wskaźnik i utrzymuje w odpowiednim miejscu wkład filtru. Koordynacja tych wszystkich funkcji jest automatyczna. Filtr ma zawór przelewowy. W przypadku zbyt dużego za-



Rys. W.1. Widok nowoczesnej konstrukcji filtru cieczy

nieczyszczenia wkładu filtru sprężyna otwiera zawór przelewowy i ciecz nie przepływa już przez zanieczyszczony element filtracyjny. Ponadto filtr jest wyposażony we wzniernik, który umożliwia naoczną obserwację przepływu, stan filtru, ruch i warunki przepływu, kolor cieczy i ewentualnie wchodzące powietrze.

Jedną z podstawowych trudności, na które napotykają producenci i użytkownicy urządzeń płynowych oraz projektanci układów, jest ustalenie, jaką czystość płynu można dopuścić oraz czy zastosowane filtry zabezpieczą poprawne działanie układu płynowego. Problem ten nie jest dotychczas teoretycznie rozwiązany pomimo wzrastającej złożoności i skomplikowanego charakteru układów hydraulicznych i pneumatycznych oraz piętrzących się trudności związanych z zabezpieczeniem ich niezawodności. Jak dotychczas nie ma oficjalnych norm ani cywilnych, ani też wojskowych, na które można byłoby się powołać. Istnieje wiele przepisów, wśród których na szczególną uwagę zasługuje najnowszy dokument klasyfikujący poziomy zanieczyszczeń cieczy — National Aerospace Standard 1638, wydany przez Aerospace Industries of America Incorporated (USA), dzielący ciecze robocze na 14 klas od 00 do 12 oraz zalecany dla hydraulicznych urządzeń automatyki w lotnictwie, przepis 598 SAE (Procedure for the Determination of Particulate Contamination of Hydraulic Fluids by the Particle Count Method). W Polsce dla niektórych wyrobów hydra-

ulicznych opracowano tymczasowe instrukcje kontroli czystości cieczy jako normy zakładowe (np. TBT-66/06-038 wyd. II — WSK Wrocław). W praktyce istnieje duża ilość metod badania czystości płynów roboczych i związanych z nimi ocen efektywności stosowanych filtrów. Metody wymagają użycia mikroskopu, liczników półautomatycznych, zautomatyzowanych analizatorów i innych urządzeń.

Ze względu na specyfikę układów płynowych prowadzącą do konieczności ciągłego podnoszenia wymagań dotyczących czystości płynów roboczych, istniejące opracowania z zakresu przepływu płynów przez ośrodki porowate nie znalazły większego zastosowania. W zakresie teorii istnieje wiele opracowań związanych przede wszystkim z filtracją naturalną. Do podstawowych w tej dziedzinie należą prace M. Muskata, Ł. S. Lejbienzona, W. N. Szczelkaczewa i B. B. Łapuka, A. E. Scheideggera, R. E. Collinsa, I. A. Czarnego, D. A. Efrosa, G. Matherona i innych.

W monografii opracowanej przez Instytut Problemów Mechaniki Akademii Nauk ZSRR dokonano podsumowania ok. 4000 prac z zakresu ogólnych zagadnień filtracji, teorii filtracji wody, ropy naftowej i gazów oraz podstawowych zastosowań tych teorii. Ze względu na zasadnicze różnice w fizyce zjawisk występujących w praktyce filtrowania płynów roboczych, w niniejszej pracy na ogół nie korzysta się ze schematów teoretycznych i badań filtracji naturalnej. Przyjmowane są jedynie niektóre definicje podstawowe oraz są wykorzystywane niektóre metody pomiarów własności fizycznych materiałów porowatych i cząstek, a ponadto zagadnienia fizykochemiczne układów dyspersyjnych.

R o z d z i a ł 1. WIADOMOŚCI PODSTAWOWE.

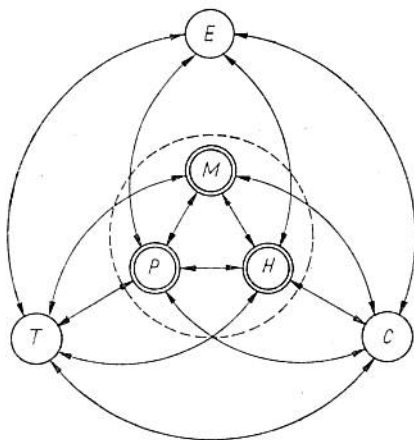
1.1. Klasyfikacja urządzeń płynowych i wpływ zanieczyszczeń na ich pracę

Urządzeniem płynowym nazywać będziemy zespół współdziałających elementów, których działanie opiera się na wykorzystaniu tzw. *płynu roboczego*. Wyróżnia się przy tym elementy charakteryzujące się czysto mechaniczną formą ruchu (*elementy czysto mechaniczne*) wykonane z ciał stałych oraz elementy charakteryzujące się płynową formą ruchu (*elementy cieczowe i gazowe*) będące w stanie płynnym. Elementy cieczowe zwane *elementami hydraulicznymi* oraz elementy gazowe zwane *elementami pneumatycznymi* niekiedy są również określone nazwą *elementów fluidycznych* (fluidiksów) — przeważnie w tych przypadkach, gdy nie występują ruchome części czysto mechaniczne. W urządzeniu płynowym muszą współpracować przynajmniej dwa wyżej wymienione elementy. Zawsze jednak urządzenie płynowe cechuje występowanie elementów bądź hydraulicznych lub pneumatycznych, bądź też obu równocześnie. Przyjęto określać urządzenia złożone z elementów czysto mechanicznych i płynowych terminem *urządzeń hydraulicznych* lub *pneumatycznych*.

W wielu rozwiązaniach konstrukcyjnych urządzeń płynowych są również wykorzystywane inne formy ruchu uważane tutaj za pomocnicze (rys. 1.1). Są to elementy charakteryzujące się elektryczną (magnetyczną), chemiczną lub termiczną formą ruchu. W przypadku skojarzenia w budowie urządzenia płynowego na przykład elementów elektrycznych, mówimy o nich jak o *urządzeniach elektrohydraulicznych* (*hydromagnetycznych*) albo *elektropneumatycznych*.

Urządzeniom płynowym wyznacza się głównie funkcję przetwarzania informacji (sterowania) oraz przetwarzania energii (ściślej przetwarzania formy ruchu energii). Urządzenia spełniające pierwszą funkcję są nazywane *płynowymi urządzeniami sterującymi*, drugą natomiast — *płynowymi urządzeniami energetycznymi* lub *siłowymi*. Wynika stąd fakt, że elementy płynowe spełniają

ją albo funkcję sterowania, albo funkcję konstrukcyjno-eksploatacyjną, czyli płyn roboczy jest integralną częścią urządzenia i powinien być uważany za jego podstawowy element. Ze względu na najtrudniejszą od strony konstrukcyjno-eksploatacyjnej funkcję



Rys. 1.1. Podział i skojarzenia form ruchu urządzeń płynowych. Na schemacie wewnątrz okręgu określonego linią przerywaną oznaczono dziedzinę form ruchu obejmującą urządzenia płynowe (M — czysto mechaniczne, H — hydrauliczne, P — pneumatyczne) oraz na zewnątrz tego okręgu pomocnicze formy ruchu urządzeń płynowych (E — elektryczne, T — termiczne, C — chemiczne)

płynu roboczego, a mianowicie zagwarantowanie niezawodności urządzeń płynowych, zajmiemy się przede wszystkim określeniem parametrów płynu roboczego, zabezpieczających poprawne działania płynowych urządzeń sterujących. Działanie płynowych urządzeń sterujących zależy głównie, przy właściwie dobranym płynie, od stopnia jego czystości. W płynowych urządzeniach energetycznych czystość cieczy decyduje o czasie pracy tych urządzeń, w mniejszym natomiast stopniu o poprawności ich działania.

Płynowe urządzenia w zależności od rodzaju funkcji spełnionej przez sterowanie można podzielić na trzy podstawowe typy:

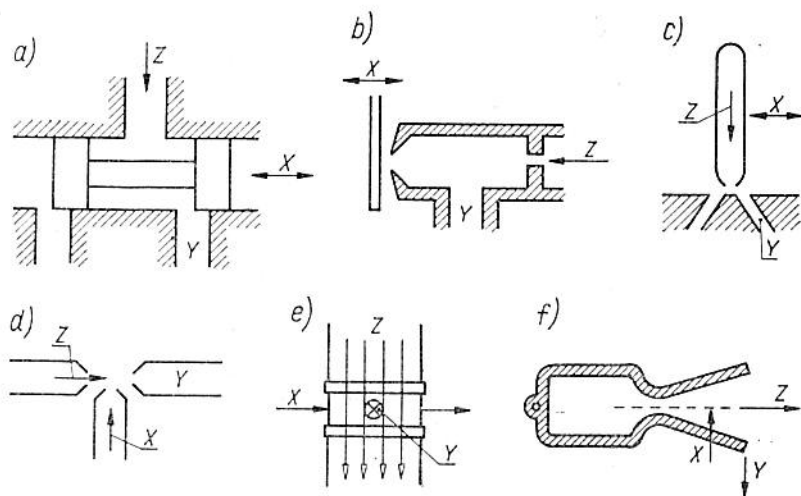
— *urządzenia generacyjne*, których działanie powoduje wytworzenie energii płynu, a przez zmianę mocy dostarczanej do generatora płynowego jest możliwe sterowanie wartościami parametrów określających ruch płynu; urządzenia generacyjne są najbardziej ekonomicznymi z punktu widzenia sprawności energetycznej sterowania;

— *urządzenia dysypacyjne*, których działanie sterujące polega na „traceniu” części energii źródła płynu i wykorzystaniu efek-

tywnym pozostałej części, bez obciążania zespołów sterujących, częścią „traconej” energii;

— *urządzenia impedancyjne*, których działanie sterujące polega również na dokonywaniu podziału energii źródła na dwie części, część „tracona” obciąża w głównej mierze zespoły sterujące.

Należy tutaj zaznaczyć, że istnieje ścisła współzależność między funkcją sterowania (przetwarzania informacji) a funkcją przetwarzania energii. Wyszczególnimy teraz podstawowe odmiany konstrukcyjne płynowych urządzeń sterujących. W wielu przypadkach zastosowań urządzenia sterujące spełniają także w głównej mierze rolę urządzeń energetycznych (rys. 1.2).



Rys. 1.2. Podstawowe odmiany konstrukcyjne płynowych elementów sterujących: a, b) elementy impedancyjne, c, d) elementy dysypacyjne, e) element generacyjny, f) element generacyjno-dysypacyjny; X, Y, Z — parametry urządzenia odpowiednio sterującego, wykonawczy (sterowany) i strumienia energetycznego (zasilanie)

Wyróżniamy tutaj elementy najbardziej rozpowszechnione: *suwak-tuleja*, *dysza-przystona*, *rurka strumieniowa-dyfuzor*, elementy nowszych konstrukcji urządzeń płynowych, elementy bez czysto mechanicznych części ruchomych — *strumieniowe*, wykorzystujące wzajemne oddziaływanie strumienia płynu, *plynomagnetyczne*, wykorzystujące oddziaływanie strumienia magnetycznego na przewodzący prąd elektryczny płyn roboczy oraz *plynotermochemiczne*, wykorzystujące działanie cieplne i chemiczne (np. wtrysk cieczy reagującej do dyszy wylotowej silnika raketowego).

W zależności od zadań oraz warunków pracy, urządzenia płynowe są budowane jako *urządzenia o działaniu ciągłym (analogowym)* lub o *działaniu dyskretnym (cyfrowym)*. We wszystkich przypadkach zastosowań są wykorzystane proste lub złożone zestawy elementów z zastosowaniem różnorodnych, przyporządkowanych tym elementom płynów roboczych.

Projektując określone urządzenie lub układ płynowy staramy się możliwie dokładnie określić nie tylko stawiane mu wymagania eksploatacyjne, takie jak nominalne parametry pracy, dopuszczalne przeciążenia i trwałość poszczególnych elementów ale i wpływ poszczególnych czynników zakłócających poprawne działanie całości. Do niedawna jeszcze jedynymi, uwzględnianymi w opracowaniach nowych urządzeń płynowych przypadkowymi oddziaływaniami środowiska zewnętrznego były zmiany temperatury otoczenia wpływające na zmianę parametrów czynnika roboczego, wywołujące zmiany wymiarów elementów wskutek rozszerzalności cieplnej oraz zwiększające „obciążenie” cieplne elementów trących się. Nie uwzględniano prawie w ogóle lokalnych zmian temperatury, które w miejscach układu o szczególnie niekorzystnych warunkach wymiany ciepła mogą kilkakrotnie przewyższać temperaturę czynnika roboczego. Zupełnie pomijano także wpływ zanieczyszczeń w czynniku roboczym na trwałość oraz dokładność działania urządzeń hydraulicznych. Należy zauważyć, że w przypadku prostych, sterowanych dużymi siłami urządzeń, takich jak np. dwu- lub trzypołożeniowe zawory hydrauliczne z wejściem mechanicznym lub elektromagnetycznym, pominięcie wymienionych czynników nie prowadziło do zaburzeń ich działania. W miarę jednak rozwoju produkcji i stopniowego wprowadzania do zakładów przemysłowych układów sterowania typu *serwozaworów elektropłynowych*, zagadnienie zanieczyszczenia płynu roboczego i związanych z nim konsekwencji staje się zasadniczym problemem tak dla producentów jak i dla użytkowników urządzeń płynowych.

W większości przypadków płyn roboczy skłonni jesteśmy uważać za idealnie czysty względnie zakładamy, że — zazwyczaj — przypadkowo wybrany filtr w zupełności zabezpiecza układ przed wpływem zanieczyszczeń. Postępowanie takie wynika z jednej strony z nieznaomości stopnia zanieczyszczenia rzeczywistego płynu roboczego, a z drugiej strony — z lekceważenia szkodliwego wpływu zanieczyszczeń na pracę urządzeń płynowych. Intuicyjnie jest sprawą oczywistą, że na przykład ciecz robocza wprowadzona do układu hydraulicznego jest silnie zanieczyszczona i napełnianie zbiornika przez przelewanie cieczy bezpośrednio z pojemników lub przy zastosowaniu filtra zgrubnego jest niedopuszczalne. Źródłami zanieczyszczeń cieczy roboczej w czasie tran-

sportu i składowania, wpływającymi wyjątkowo niekorzystnie — z punktu widzenia eksploatacji — na jakość cieczy, są:

- domieszki mineralne, dostające się do cieczy podczas prze-
róbki ropy;
- zanieczyszczenia technologiczne,
- produkty korozji urządzeń produkcyjnych w procesie pro-
dukcji cieczy,
- produkty korozji cystern transportowych,
- zanieczyszczenia przedostające się z atmosfery w czasie
napełniania i opróżniania pojemników,
- zanieczyszczenia wynikłe z nieprzemycia opakowań trans-
portowych,
- produkty zużycia urządzeń przepompowujących,
- pył i para przedostające się do zbiorników przy zmianach
ich napełnienia,

Na podstawie analizy osadów na filtrach stwierdza się, że za-
sadniczą część zanieczyszczeń stanowią cząstki stałe i ostre —
kwarc, szpat, tlenki metali. Zanieczyszczenia organiczne występują
w nieznacznych ilościach, mniejszych od 20÷25%. Widać więc, że
w większości zanieczyszczenia są twardsze od materiałów użytych
do wykonania urządzeń hydraulicznych. O tym, jak nieskuteczne
jest zgrubne filtrowanie mogą przekonać dane z tabl. 1.1, w któ-
rej podano ilość zanieczyszczeń w próbkach z poszczególnych za-
kresów wymiarowych. Dane te wyraźnie wykazują, że większość
cząstek największych, a więc najniebezpieczniejszych dla popraw-

Tablica 1.1. Wpływ stosowania filtrów na zawartość zanieczyszczeń [80]

Średnica cząstek μm	Koncentracja objętościowa zanieczyszczeń w oleju AMG-10 w %			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
2-4	0,000005	0,000095	0,000158	0,0000066
4-8	0,000028	0,000069	0,000069	0,0000109
8-13	0,000023	0,000087	0,000232	0,0000116
13-18	0,000039	0,000059	0,000294	—
22-35	0,000272	0,000181	0,000272	—
40-60	—	—	0,002180	—
65-85	—	—	0,004900	—
Razem	0,000367 (ok. 10000 szt/cm ³)	0,000491 (ok. 80000 szt/cm ³)	0,008105 (ok. 130000 szt/cm ³)	0,0000291 (ok. 6500 szt/cm ³)

a — olej standardowo czysty, *b* — olej z pracującego układu hydraulicznego z filtrem papierowym o dokładności oczyszczenia 11-13 μm ; *c* — olej z pracującego układu hydraulicznego z filtrem siatkowym o dokładności oczyszczenia 35-50 μm ; *d* — olej standardowo czysty przepuszczony dodatkowo przez filtr papierowy o dużej dokładności oczyszczenia.

nej pracy urządzeń, zostaje wprowadzona do układu wraz z czynnikiem roboczym.

Nie znaczy to jednak, że dokładne oczyszczenie cieczy roboczej w czasie wprowadzania jej do układu umożliwia zastosowanie mniej dokładnych filtrów w samym układzie. Należy pamiętać o tym, że ilość zanieczyszczeń w zamkniętym układzie stale wzrasta w wyniku:

- ściernego zużywania się elementów,
- erozji wywołanej przepływem,
- normalnego zużywania się części ruchomych,
- przyspieszonego (występowaniem zanieczyszczeń) zużycia części ruchomych,
- odrywania się powłok wewnętrznych (farb, lakierów, itp.),
- reakcji cieczy z materiałami,
- działalności organizmów biologicznych,
- niszczenia uszczelnień,
- radiacji nuklearnej,
- przedostawania się pyłu z otoczenia.

Tylko dokładne filtrowanie zapobiega „lawinowemu” narastaniu tego procesu.

O konieczności ciągłego filtrowania czynnika roboczego przekonują także liczne badania dotyczące aglomeracji cząstek drobnych. Analiza zanieczyszczeń w próbkach ze zbiorników cieczy dokładnie oczyszczonej przed zalewaniem filtrem o dokładności oczyszczania równej 10 μm wykazała istnienie cząstek o wymiarach 50÷200 μm . Jedynym wyjaśnieniem ich pojawienia się może być zjawisko łączenia cząstek małych (aglomeracja). Zostało ono potwierdzone praktycznie, przy czym stwierdzono, że:

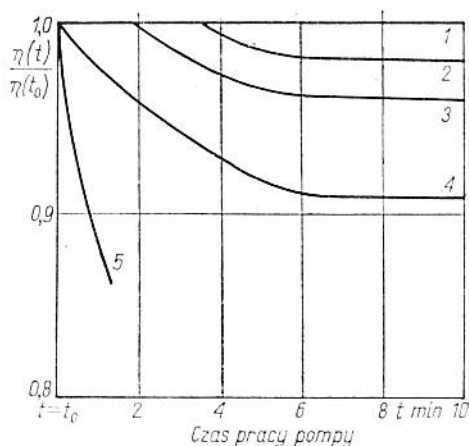
- drgania powodują wzrost ilości cząstek dużych (przez zwiększenie częstości zderzeń cząstek małych),
- duże cząstki (50÷200 mikrometrów) rozpadają się przy zderzeniach,
- nawet po dokładnym przefiltrowaniu cieczy i szczelnym zamknięciu zbiornika cząstki duże pojawiają się ponownie,
- wzrost wymiarów cząstek obserwowano w zwykłych olejach, nie następował natomiast wzrost wymiarów w olejach np. z dodatkami antypolaryzującymi.

Przypuszczalnie przyczyną łączenia cząstek są siły adhezji pomiędzy warstwami polimerów adsorbowanymi przez małe cząstki. Dlatego też opisane zjawisko występuje szczególnie wyraźnie w przypadku cieczy roboczych z dodatkami syntetycznymi, np. stabilizującymi wskaźnik lepkości. Dla cieczy nie zawierających dodatków syntetycznych, aglomeracja nie stanowi istotnego źródła dużych zanieczyszczeń. Wpływ aglomeracji cząstek na pracę układu jest dwojaki. Z jednej strony ułatwia oddzielenie zanie-

czyszczeń nawet za pomocą zgrubnych filtrów, z drugiej zaś — powoduje konieczność zabezpieczania dodatkowymi filtrami odpowiedzialnych elementów oporowych. Uniwersalne rozwiązanie polega na odfiltrowaniu z cieczy zanieczyszczeń o wymiarach większych od 3÷5 mikrometrów. Doświadczalnie stwierdzono, że bardzo małe cząstki lub cząstki o niewielkiej koncentracji nie łączą się, gdyż szybkość możliwej aglomeracji jest wprost proporcjonalna do kwadratu koncentracji zanieczyszczeń i maleje w czasie procesu łączenia się. Rozwiązanie takie jest jeszcze zbyt drogie do stosowania w skali przemysłowej.

Musimy więc pogodzić się z występowaniem w układach hydraulicznych silnie zanieczyszczonej cieczy roboczej. W związku z tym należy zwrócić baczniejszą uwagę na wpływ zanieczyszczeń na pracę poszczególnych elementów układów hydraulicznych i wpływające stąd wnioski konstrukcyjne. W układach pneumatycznych zagadnienia te są podobne z tą różnicą, że zanieczyszczenia gazu mają odmienne źródło.

Najpoważniejszymi w skutkach są trwałe uszkodzenia urządzeń wywołane ciągłym działaniem stałych cząstek zanieczyszczeń na ruchome elementy układu. Zmiana luzów pomiędzy odpowiedzialnymi częściami wywołana zużyciem, z reguły prowadzi do obniżenia sprawności układu, często także do zmniejszenia wytrzymałości części i zniszczenia lub czasowego unieruchomienia urządzenia. Na rys. 1.3 przedstawiono przykładowe charakterystyki zmian w czasie względnego współczynnika sprawności objętościowej pompy wielotłokowej w zależności od wymiarów zanieczyszczeń płynu roboczego cząstkami elektrokorundu o wymia-



Rys. 1.3. Zmiana sprawności objętościowej pompy zależna od stopnia zanieczyszczenia

rach: 1÷3 μm (krzywa 2), 5÷10 μm (krzywa 3), 15÷25 μm (krzywa 4), 1÷40 μm (krzywa 5). Prosta 1 odpowiada cieczy dokładnie przefiltrowanej.

Przedstawiony wpływ zanieczyszczeń można częściowo zredukować przez zastosowanie odpowiedniego płynu roboczego i dokładne jego filtrowanie. W przypadku pomp hydraulicznych szczególnie duże znaczenie mają dodatki stabilizujące lepkość cieczy i równocześnie powodujące opisane poprzednio zjawisko aglomeracji.

Tablica 1.2. Charakterystyka wpływu zanieczyszczeń na pracę urządzeń płynowych

Własności cząstek zanieczyszczeń	Wpływ na pracę elementów układu	Sposoby korekcji
Wymiar	opory stałe, nastawione i dyszki są zatykane przez cząstki o takim samym lub większym wymiarze (max. wymiar liniowy)	dobrac odpowiednie filtry zatrzymujące wszystkie cząstki większe od najmniejszego wymiaru liniowego oporu
	zawory zakleszczają się i wzrasta ich histereza; do przestawienia są wymagane większe siły; następuje szybkie zużywanie się elementów współpracujących	ponieważ przecieki i szerokość strefy nieczułości zależą od wielkości luzu promieniowego, należy odpowiednio projektować zawory
Kształt	filtry oddzielają zazwyczaj zanieczyszczenia określone wymiarami porów; opory, dyszki itp. zatrzymują zanieczyszczenia ze względu na ich największy wymiar	usuwać zanieczyszczenia długie (włosy, nitki, włókna itp.)
Materiał	materiały magnetyczne powodują rozrastanie się cząstek; cząstki stałe są przyczyną zakleszczania się suwaków; materiały miękkie są przepychane przez filtr, a następnie powiększają one swoje wymiary	dążyć do jak najdokładniejszego oczyszczenia płynu roboczego; odpowiednio projektować zawory (np. zmniejszać powierzchnię kontaktu zaworu i gniazda)
Rozproszenie w płynie (lekkie cząstki występują w większej liczbie w strumieniu płynu niż ciężkie, małe – częściej niż duże)	płyn roboczy z rozproszonymi w nim zanieczyszczeniami jest doprowadzany do zaworów; wpływ na pracę podobny jak przy oddziaływaniu „wymiarowym” cząstek	analizować w trakcie projektowania system połączeń, lepkość płynu oraz warunki zewnętrzne, takie jak wibracje i temperatura, powodująca rozpraszanie lub koagulację cząstek zanieczyszczeń

racji. Umożliwia ono efektywniejsze oddzielanie zanieczyszczeń przy tej samej dokładności nominalnej zastosowanego filtra.

Dla urządzeń sterujących oraz filtrów szczególnie niebezpieczne są uszkodzenia polegające na zatykaniu małych otworów, przede wszystkim dyszek sterujących, oporów stałych o kształcie cylindrycznym, płaskim itp., porowatych wkładów filtrujących (które można uważać za zbiór wielu miniaturowych oporów), oraz zakleszczaniu elementów ruchomych. Jakkolwiek uszkodzenia tego typu nie pozostawiają na elementach urządzeń płynowych wyraźnych, trwałych śladów (z wyjątkiem rys na suwakach rozrządowych), to jednak zaburzenia przebiegu procesu sterowanego, spowodowane chwilowym spadkiem czułości, np. regulatora, lub spadkiem ciśnienia w obwodzie, mogą być olbrzymie. Dlatego niezbędne jest poznanie wpływu zanieczyszczeń na elementy tego typu.

Przedstawiona tabl. 1.2 zawiera ogólną charakterystykę zanieczyszczeń w układach płynowych i ich wpływ na pracę odpowiedzialnych elementów.

1.2. Płyny robocze

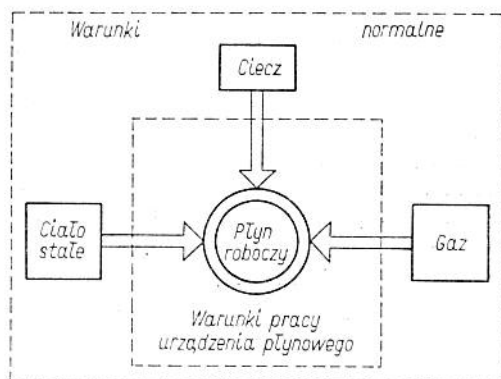
1.2.1. Płyn roboczy i jego funkcje

Wszystkie te elementy łączy funkcjonalnie płyn roboczy. trzy podstawowe grupy wyróżniające współzależność zmian parametrów płynu i parametrów mechanicznych układu:

- 1) elementy, w których zachodzi zmiana tylko parametrów płynu roboczego (*filtry, wymienniki ciepła*),
- 2) elementy, w których zachodzi zmiana parametrów mechanicznych w celu zmiany parametrów płynu roboczego (*rozrządy*),
- 3) elementy, w których zachodzą jednocześnie zmiany parametrów płynu roboczego i parametrów mechanicznych (*silniki płynowe*).

Wszystkie te elementy łączy funkcjonalnie płyn roboczy. Podstawową jego cechą jest to, że w czasie pracy urządzenia znajduje się w fazie płynnej i poprzez zmianę swoich parametrów umożliwia przenoszenie sygnału sterującego oraz wypełnianie innych funkcji konstrukcyjno-eksploatacyjnych. Cecha ta rozszerza w pewnym sensie dotychczasowy zakres pojęciowy i daje podstawę do sprecyzowania ogólnych wymagań stawianych płynom roboczym.

Tak więc płyn roboczy w warunkach normalnych (temperatura 20°C, ciśnienie atmosferyczne 760 mm Hg) może przybierać w zasadzie wszystkie stany skupienia materii. Może być ciałem stałym, ciekłym lub gazowym (rys. 1.4). Ważny jest płynny stan skupienia w warunkach pracy urządzenia.



Rys. 1.4. Możliwe stany skupienia płynu roboczego w warunkach normalnych

Płyn roboczy w urządzeniach spełnia trzy podstawowe funkcje:

- 1) funkcję sterowania — jako nośnik informacji,
- 2) funkcję konstrukcyjną — jako nośnik energii,
- 3) funkcję eksploatacyjną — dla zapewnienia właściwego działania elementów układu (np. smarowanie części wykonujących wzajemne przemieszczenia w układach hydraulicznych).

Zróżnicowanie funkcji spełnianych przez płyn roboczy ma swoje uzasadnienie. Rola płynu roboczego jako elementu przeniesienia energii jest zasadnicza. Wielkość sił przenoszonych jest uzależniona od parametrów konstrukcyjnych opartych na założeniach wynikających z przeznaczenia układu. Scharakteryzować je można za pomocą ciśnień roboczych i natężeń przepływu. Stąd można określić konstrukcyjne parametry obwodu (np. grubość ścianek, wymiary kanałów itp.). Istnieje rozpowszechniona teoria i praktyka obliczania parametrów członów urządzeń ze względu na założone warunki eksploatacyjne. W zasadzie praktyka tych obliczeń obejmuje również i funkcję spełnianą przez płyn roboczy jako element przeniesienia sygnału. Jednak ze względu na różnicę „poziomów” przekazywanych informacji należy uwzględnić dodatkowo wiele innych parametrów płynu roboczego i poznać znacznie dokładniej ich zmiany, aby funkcja spełniana przez płyn w zakresie

przenoszenia sygnału była należycie wypełniona. Nakłada to dodatkowe wymagania w zakresie znajomości płynów roboczych stawiane konstruktorom urządzeń płynowych, a zarazem zaostrza wymagania dotyczące jakości tych płynów.

Kompleksowa znajomość wymagań wynikających z funkcji spełnianych przez płyn, wymagań niekiedy nawet paradoksalnych umożliwiła określenie pewnych optymalnych wartości parametrów płynu roboczego. Znajomość ich jest konieczna dla konstruktorów, wykonawców i użytkowników urządzeń płynowych.

1.2.2. Podział płynów roboczych

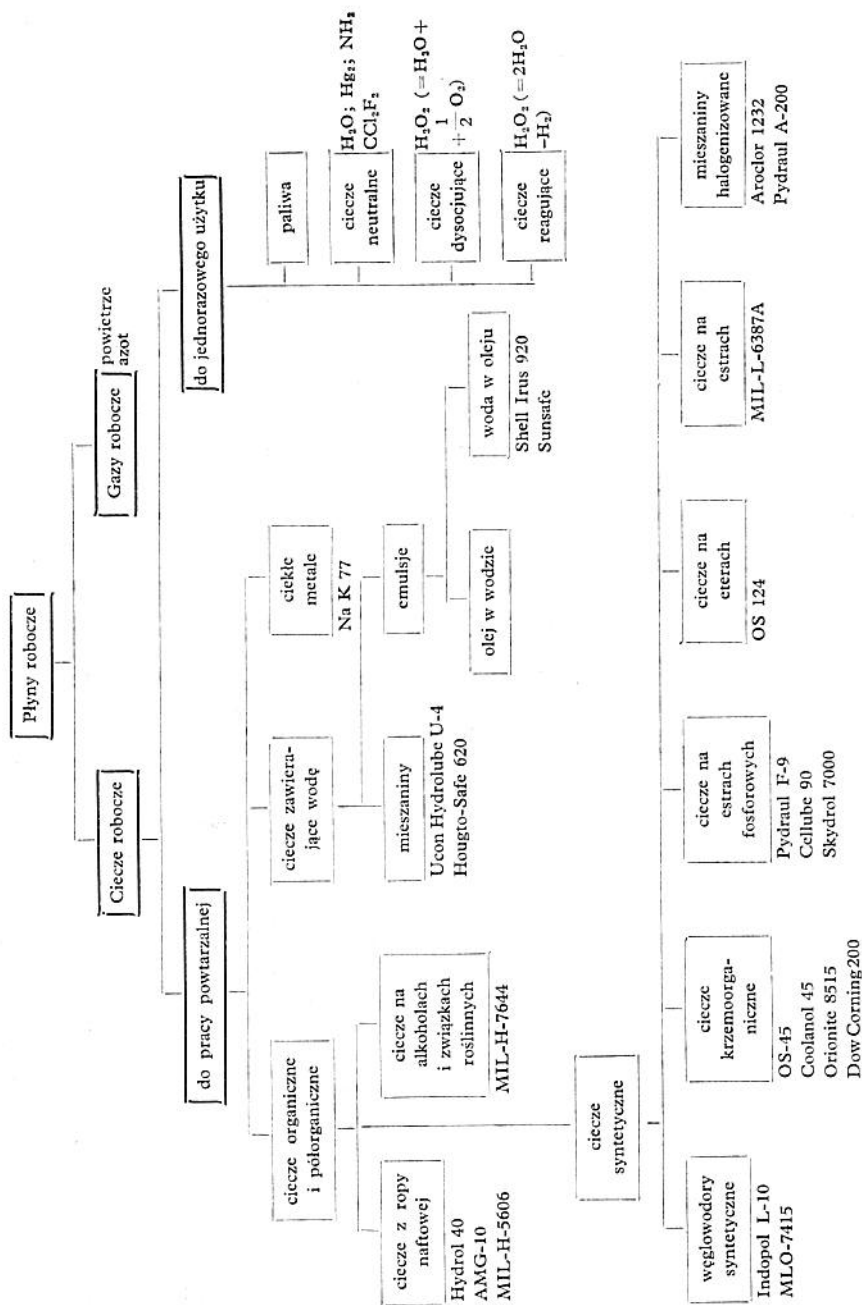
Podstawą klasyfikacji płynów roboczych jest stan skupienia fazy podstawowej. Istnieje oprócz tego podział „użytkowy” płynów roboczych, określający ich podstawowe parametry fizykochemiczne, podział ze względu na temperaturowe warunki pracy, podział ze względu na własności chemiczne, termiczne itp. Wyróżnia się przy tym dwa podstawowe rodzaje płynów: *ciecze* i *gazy*. Urządzenia cieczowe zwane *urządzeniami hydraulicznymi* i urządzenia gazowe (aeroliczne) zwane *urządzeniami pneumatycznymi* wywodzą swoje nazwy i podział od stanu skupienia płynu roboczego. Ze względu na zasadnicze różnice we własnościach obu tych płynów w dalszych rozważaniach będziemy zawsze wyróżniali *ciecze robocze* i *gazy robocze*. W przypadkach, gdy własności płynów, cieczy i gazów lub urządzeń płynowych — hydraulicznych i pneumatycznych nie będą wykazywały istotnych różnic fizycznych, omawiane będą bez wyróżniania.

Przy opisie własności płynów roboczych zasadnicza część odnosi się do własności cieczy. Wiąże się to głównie z aktualnym stanem techniki urządzeń płynowych i stosowanych rodzajów płynów. W użyciu znajdują się bowiem niezliczone rodzaje cieczy roboczych, natomiast w urządzeniach pneumatycznych jest wykorzystywane przede wszystkim powietrze jako gaz roboczy. Oprócz tego, ze względu na cenę i długotrwałe używanie cieczy roboczych w cyklu pracy powtarzalnej, w przeciwieństwie do powietrza, które wykorzystuje się w cyklu jednorazowym, zwrócenie głównej uwagi na ciecze robocze wydaje się jak najbardziej celowe. Względny te zadecydowały również i o tym, że w podziale wyodrębniającym skład chemiczny płynów roboczych wyszczególniono bardziej szczegółowo ciecze robocze.

a) Podział ze względu na liczbę faz:

— *płyn jednofazowy* — gaz lub mieszaniny gazów, ciecz lub mieszanina cieczy;

— *płyn dwufazowy* — emulsja (układ dyspersyjny cieczy



Rys. 1.5. Podział płynów roboczych w zależności od składu chemicznego. Dla lepszego zilustrowania podano przykłady najczęściej stosowanych płynów

w cieczy), mgła (układ dyspersyjny cieczy w gazie), piana (układ dyspersyjny gazu w cieczy),

— *płyn wielofazowy* — emulsje, mgły i piany wieloskładnikowe.

W praktyce wykorzystuje się lub dąży do wykorzystania jako płynu roboczego — płynu jednofazowego. Niemniej jednak w wielu przypadkach celowe jest stosowanie jako płynu roboczego również i płynów dwufazowych. W warunkach eksploatacji urządzeń płynowych spotyka się różne rodzaje płynów roboczych.

Rzeczywiste płyny robocze są z zasady płynami wielofazowymi. Zawartość zdyspergowanych cząstek w fazie podstawowej, poza niektórymi zastosowaniami mgły oraz emulsji, stanowi niepożądany dodatek, który będziemy uważać za zanieczyszczenia.

Przedstawiona ogólna klasyfikacja płynów roboczych w zależności od liczby faz ma charakter poglądowy.

b) Podział ze względu na skład chemiczny (rys. 1.5):

— *ciecze robocze* — organiczne i półorganiczne, na bazie wodnej, ciekłe metale oraz ciecze do jednorazowego użytku stosowane najczęściej w krótkotrwałych cyklach sterowania hydrotermicznego lub w urządzeniach spalinowych;

— *gazy robocze*.

c) Podział ze względu na lepkość (tylko w odniesieniu do cieczy):

— klasyfikacja SAE — odpowiednie zakresy lepkości cieczy mają numery;

— klasyfikacja przyjęta w Europie (zakresy lepkości w °E w temperaturze oleju 50°C);

— klasyfikacja przyjęta w USA (zakresy lepkości w uniwersalnych sekundach Saybolta w temperaturze 100°F).

Obie ostatnie klasyfikacje wyróżniają kilka grup cieczy (*ekstra płynne, bardzo płynne, półpłynne, półgęste, gęste i bardzo gęste*). Różnica polega na nieco odmiennych wartościach zakresów poszczególnych grup dla odpowiednich temperatur (tabl. 1.3).

d) Podział ze względu na temperaturowe warunki pracy (zakres temperatur otoczenia, w jakich może pracować urządzenie) podano w tabl. 1.4.

e) Podział ze względu na własności termiczne:

— *ciecze palne* (temp. zapłonu do +200°C);

— *ciecze trudno palne* (temp. zapłonu +200 do +300°C);

— *ciecze niepalne* (temp. zapłonu powyżej 300°C).

Każda ciecz pali się w określonych warunkach. Ciecze określone jako palne i niepalne nie wykazują skłonności do rozprzestrzeniania się płomienia na otaczającą ciecz w przypadku zapłonu miejscowego.

Tablica 1.3. Podział cieczy ze względu na lepkość

Ciecze	Lepkość		
	°E (w 50°C)	cSt (w 50°C)	S (w 100° F = 37,7°C) (USA)
Ekstra płynne	poniżej 2	poniżej 12	—
Bardzo płynne	2-3	12-20	100-150
Płynne	3-4	20-30	200-250
Półpłynne	4-5	30-40	300-350
Półgęste	5-7	40-50	500-550
Gęste	7-10	50-80	800-900
Bardzo gęste	powyżej 10	powyżej 80	1000-1300

Tablica 1.4. Podział cieczy roboczych ze względu na zakres temperatur pracy

Ciecz do pracy w temperaturze	Zakres temperatur otoczenia w °C		
	I	II	III
Bardzo niskiej	-70 do +50	-60 do +60	-33,9 do +71,1
Niskiej	-50 do +50	-20 do +70	-53,9 do +135
Normalnej	-25 do +50	+5 do +80	-33,9 do +204,4
Wysokiej	do +200	+5 do +120	-53,9 do +287,8
Bardzo wysokiej	0 do +400	+5 do +200	-17,8 do +372,1
Płomienia, silnego nagrzania, promieniowania, spalania itp.	+5 do +1200 (+5 do +650)	+5 do +450	-4,4 do 537,8

Grupy podziału: I — urządzenia pracujące w bardzo trudnych warunkach (lotnictwo, energetyka atomowa, metalurgia itp.), II — urządzenia przemysłu maszynowego, III — podział stosowany w USA.

f) Podział ze względu na czas pracy:

— *ciecze świeże*, nieużywane, otrzymane z rafinerii lub z punktu sprzedaży produktów olejowych (naftowych);

— *ciecze używane*, znajdujące się w urządzeniach lub z nich usunięte, lecz nadające się jeszcze do użytku (ciecz świeża z chwilą wprowadzenia jej do urządzenia staje się cieczą używaną);

— *ciecze zużyte*, sprzedawane lub oddawane do regeneracji;

— *ciecze regenerowane*.

g) Podział ze względu na przeznaczenie.

Tabele klasyfikujące podają zarówno zasadnicze przeznaczenie cieczy, jak również określają warunki, w jakich możliwa jest ich praca. Na ogół spotyka się tego rodzaju podział, zawierający nazwę produktu, normy lub warunki techniczne, znak na opakowaniu, podstawowe parametry (lepkość, temperaturę zapłonu i krzepnięcia) oraz zasadnicze przeznaczenie.

Ogólna klasyfikacja użytkowa cieczy wyróżnia między innymi następujące grupy:

- *ciecze przemysłowe* (PM);
- *ciecze sprężarkowe* (Sp);
- *ciecze elektroizolacyjne* (EL);
- *ciecze technologiczne* (Te);
- *ciecze turbinowe* (Tu);
- *ciecze silnikowe* (SI);
- *ciecze hydrauliczne* (Hd);
- *ciecze przekładniowe* (Pk).

Poszczególne grupy cieczy dzieli się na podgrupy. I tak np. ciecze hydrauliczne można podzielić na podgrupy w zależności od układu hydraulicznego, w jakim dana ciecz może pracować. A więc ciecze do pracy w układach: lotniczych, obrabiarkowych, górniczych, okrętowych itp.

Coraz trudniejsze warunki eksploatacyjne (w licznych zastosowaniach wojskowych i astronautycznych, hutnictwie, przemyśle górniczym i maszyn drogowych) oraz rosnące wymagania dotyczące niezawodności urządzeń spowodowały wzrost nakładów na badania związane z wprowadzeniem nowych rodzajów cieczy roboczych. W wyniku tego pojawiło się ostatnio wiele nowych typów cieczy roboczych o doskonałych własnościach.

Spośród *cieczy palnych* należy wymienić tzw. „nową generację cieczy naftowych” o doskonałych własnościach smarnych, istotnych zwłaszcza przy pracy w wysokich ciśnieniach. Są to specjalne oleje samochodowe, oznaczane w USA jako „MS motor oils” lub „anty — zużyciowe” ciecze robocze oraz ciecze niepalne.

Najciekawszymi z *cieczy niepalnych* są:

— *ciecze syntetyczne* — na estrach kwasu fosforowego oraz węglowodorach chlorowanych, o doskonałych własnościach smarnych w wysokich ciśnieniach i dlatego zalecane zwłaszcza dla silnie obciążonych pomp;

— *ciecze woda-glikol* — o doskonałych własnościach w niskich temperaturach, wymagające jednak stabilizacji temperatury pracy w wyższych temperaturach, w celu uniknięcia strat wody, która stanowi 35÷50% objętości cieczy roboczej;

— *emulsje wodno-olejowe* — zalecane zwłaszcza dla potrzeb górnictwa i eksploatacji maszyn na wolnym powietrzu ze względu na wysoką stabilność i niewrażliwość na mróz (np. Houghto-Safe) ma-

ją dużą lepkość i wskutek tego mają właściwości łatwego uszczelniania, a ich wyraźny kolor umożliwia szybką lokalizację przecieków; zawierają około 40% wody;

— *cieczce syntetyczne rozpuszczone w oleju* — są to stałe, stabilne formacje dokładnie selekcyjonowanych frakcji ropy naftowej w syntetycznej bazie chlorowanych węglowodorów i estrów kwasu fosforowego; mają najlepsze ze wszystkich wymienionych cieczy właściwości, a ich cena jest zbliżona do ceny cieczy woda-glikol;

— *ciekłe metale* (sód, eutektyka sodowo-potasowa, eutektyka sodowo-cezowa, rtęć itp.) — nie stanowią oczywiście cieczy roboczych w ścisłym tego słowa znaczeniu.

Ciekłe metale wykazują znaczne podobieństwo pewnych własności eksploatacyjnych (duży moduł sprężystości objętościowej, podobne zjawiska przy przepływie itp.). Wydaje się, że ciekłe metale stanowią grupę „przyszłościowych” płynów roboczych, ze względu na liczne zalety, niemożliwe do osiągnięcia w przypadku konwencjonalnych cieczy roboczych (wysoka temperatura pracy, łatwość wykonywania pomp bez części ruchomych, wykorzystujących elektryczne własności metali itp.). Należy jednak zauważyć, że ze względu na słabo opracowaną jeszcze teorię i brak doświadczenia praktycznego przy konstrukcji odpowiednich urządzeń, ciekłe metale nie zostały jeszcze w dostatecznym stopniu wprowadzone w technice jako czynnik roboczy.

1.2.3. Własności płynów roboczych

Omówimy teraz podstawowe cechy niektórych grup płynów roboczych wyszczególnionych w podziale uwzględniającym skład chemiczny.

Ciecze otrzymywane z ropy naftowej. Mają one zastosowanie głównie do pracy w temperaturze normalnej (lepkość w granicach 2,5 do 8°E w temperaturze 50°C), a przy odpowiedniej technologii i dodatkach można stosować je również od temperatury -25°C. Są to przede wszystkim *oleje mineralne*. Najbardziej wyróżniającym się ze względu na dużą stabilność lepkościową jest olej bardzo płynny firmy Esso Standard, Invarol J.43. Ten olej mineralny charakteryzuje się bardzo wysokim wskaźnikiem lepkości¹⁾, bo wynoszącym 225. Temperatura krzepnięcia wynosi -68°C. Stosowany jest również w hydraulicznych urządzeniach regulacji w lotnictwie. W oficjalnej specyfikacji olej ten ma różne oznaczenia. Oznaczenia angielskie: DTD-585, amerykańskie MIL-0-5606 (popularnie zwany „red oil”), międzynarodowe OM-15.

¹⁾ Określenie wskaźnika lepkości patrz PN/C-04015 oraz np. DIN 51563, ASTM D 2270-64; ASTM D 341-43 (68).

Polskie oleje mineralne do napędów hydraulicznych o nazwie Hydrol obejmują typoszereg w zakresie lepkości od 1,5 do 10^{°E} w temperaturze 50^{°C}.

Oleje mineralne w porównaniu z innymi rodzajami cieczy roboczych są dość trwałe w czasie, produkcja ich jest prosta i rozwinięta w skali przemysłowej. Oprócz takich wad jak palność, duża zmiana lepkości ze zmianą temperatury, konieczność stosowania uszczelnień z kauczuku syntetycznego, oleje mineralne mają bardzo istotne zalety, do których przede wszystkim należą dobre własności smarne. Zakres stosowalności olejów mineralnych jest w zasadzie ograniczony górną temperaturą pracy wynoszącą 150^{°C}.

W tabl. 1.5 i 1.6 podano podstawowe dane techniczne cieczy roboczych stosowanych w Polsce, w tabl. 1.7 — zestawienie olejów krajowych o zbliżonej lepkości w temperaturze 50 i 100^{°C}, a w tabl. 1.8 — zestawienie olejów zalecanych i wykaz olejów zastępczych do urządzeń hydraulicznych z asortymentu produkowanego w Polsce. W tabl. 1.9 wskazano na możliwości stosowania niektórych olejów zagranicznych zamiast krajowych olejów hydraulicznych.

Na rys. 1.6 podano przykładowe przebiegi zmiany lepkości w zależności od temperatury dla najczęściej stosowanych w Polsce w układach hydraulicznych olejów mineralnych, a na rys. 1.7 podobne typowe zależności o różnym składzie chemicznym.

Ciecze otrzymane z oleju rycynowego. Stosowane są one głównie jako płyny hamulcowe. Szeroki zakres zastosowania olejów rycynowych wynika z najlepszego wśród cieczy mineralnych, roślinnych i zwierzęcych współdziałania z gumą. Do rafinowanego oleju rycynowego ze względu na jego dużą lepkość dodaje się rozpuszczalniki w postaci alkoholi oraz eterów glikolu.

Woda i ciecze zawierające wodę. Woda jest mieszaniną cząsteczek zbudowanych z różnych izotopów wodoru i tlenu o następujących wzorach chemicznych: H₂¹⁶O, H₂¹⁷O, H₂¹⁸O, HD¹⁶O, HD¹⁷O, HD¹⁸O; D₂¹⁶O, D₂¹⁷O, D₂¹⁸O (woda ciężka) oraz T₂O (woda trytowa — superciężka). W tabl. 1.10 i 1.11 podano podstawowe dane techniczne wody.

Woda była pierwszą cieczą roboczą, stosowaną w urządzeniach hydraulicznych. Znacznie później wprowadzono mieszaniny gliceryny i glikolu z wodą. Temperatura zapłonu cieczy na wodzie zależy od zawartości wody. W wysokiej temperaturze dzięki powstawaniu pary wodnej, zostaje udostępniony dopływ tlenu i dopiero po wyparowaniu wody spalają się pozostałe składniki. Na ogół górna granica pracy cieczy zawierającej wodę wynosi ok. 60^{°C}. Dopuszczalna dolna temperatura pracy jest zależna od składu cieczy.

Tablica 1.5. Podstawowe dane technicznych olejów mineralnych stosowanych

Przeznaczenie	Nazwa lub symbol oleju	Rodzaj dodatków							Własności		
		inhibitor utleniania	inhibitor korozji	lepkościowy	smarnościowy	przeciwpien.	przeciw emulgowaniu	depresator	lepkość cSt		
									-10	+20	+50
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Silnikowe SI	Lux 5	-	-	-	-	-	-	-	ok. 3000	ok. 220	37,4-45,2
	Lux 7	-	-	-	-	-	-	-	ok. 6000	ok. 350	53-60,6
	Lux 10	-	-	-	-	-	-	-	ok. 3000	ok. 460	78,8-83,5
	Lux 13	-	-	+	-	-	-	-	ok. 10000	ok. 570	89-106
	Extra 15	-	-	+	-	-	-	+	-	ok. 900	ok. 120
	Lux (dw)	-	-	-	-	-	-	+	ok. 5000	ok. 350	≥ 80
	MS-20	-	-	-	-	-	-	-	ok. 30000	ok. 1200	ok. 150
Hydrauliczne Hd	AMG-10	-	-	-	-	-	-	+	ok. 55 w 50°C	ok. 20	> 10
	Hydrol 10	+	+	+	+	+	-	+	ok. 250	ok. 35	7-13
	Hydrol 20	+	+	+	+	+	-	+	ok. 1200	ok. 100	20-25
	Hydrol 30	+	+	+	+	+	-	+	ok. 1900	ok. 150	28-35
	Hydrol 40	+	+	+	+	+	-	+	ok. 3500	ok. 200	41-45
	Hydrol 150	+	+	+	+	+	-	+	ok. 4500	ok. 250	50-55
	Hydrol 70	+	+	+	+	+	-	+	ok. 8000	ok. 400	70-78
Przeładniowe PK	Hipol 10	+	+	+	+	+	-	+	ok. 7000	ok. 400	≥ 55
	Hipol 15	+	+	+	+	+	-	+	-	-	≥ 110
	Hipol 30	+	+	+	+	+	-	+	-	-	≥ 185
	Transol 40	+	+	+	+	+	-	+	ok. 400	ok. 300	≥ 40
	80	+	+	+	+	+	-	+	-	-	≥ 80
	130	+	+	+	+	+	-	+	-	-	≥ 120
	190	+	+	+	+	+	-	+	-	-	≥ 175

Bardzo istotną wadą cieczy zawierających wodę, są straty na skutek odparowania, które trzeba uzupełniać, aby ciecz nie straciła swych właściwości, co jest niezwykle kłopotliwe. Stosowanie czystej wody eliminuje tę wadę, ale powoduje powstawanie innych problemów, które komplikują budowę układu. W niektórych dziedzinach regulacji (np. regulacja turbin) rozwiązano już problem zastąpienia olejów hydraulicznych przez wodę.

w Polsce różnego przeznaczenia oraz wskaźniki jakości tych olejów [54]

charakterystyczne											
w temp. °C	punkt anilinowy	temperatura °C		wskaźnik lepkości WL		odporność na				Wskaźnik jakości — suma wartości kolumn od 18 do 23	
+100		zapłonu (nie mniej)	krzep. (nie więcej)	wartość liczbowa	wg punktacji	smarność	utlenienie	korozję	ścianic		pienienie
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
6,2	ok. 93	185	-20	∨ ∨ 60	2	4	4	4	5	0	19
8,5	ok. 95	195	-15	∨ ∨ 60	2	4	4	4	5	2	21
9,7	ok. 97	195	-15	∨ ∨ 60	2	4	4	4	5	3	22
12,6	ok. 100	210	-20	∨ ∨ 55	1	4	4	3	5	1	18
ok. 16	ok. 105	220	-5	ok. 80	3	4	4	2	5	5	23
13-15	—	220	-15	∨ 75	3	3	4	4	5	5	24
> 20	ok. 120	225	-18	ok. 70	3	4	4	4	5	3	23
ok. 4,6	ok. 85	92	-70	ok. 250	5	5	2	1	2	5	20
ok. 3,0	70	150	-35	∨ 95	5	5	5	5	3	5	28
ok. 5,5	75	180	-35	∨ ∨ 95	5	5	5	5	3	5	28
ok. 6,8	80	195	-25	∨ ∨ 95	5	5	5	5	3	5	28
ok. 8,0	80	200	-25	∨ ∨ 95	5	5	5	5	2	5	27
ok. 9,5	90	210	-25	∨ ∨ 90	5	5	5	5	3	5	29
ok. 11,0	90	220	-25	∨ 90	5	5	5	5	3	5	29
9-12	—	190	-30	∨ 80	4	6	5	5	3	5	28
15-20	—	200	-20	∨ 80	4	6	5	5	4	5	29
22-30	—	200	-15	∨ ∨ 80	4	6	5	5	5	5	30
8-12	—	170	-30	∨ ∨ 80	4	6	5	5	2	5	27
12-15	—	190	-20	∨ ∨ 80	4	6	5	5	3	5	28
17-20	—	210	-20	∨ ∨ 80	4	6	5	5	4	5	29
22-26	—	215	-15	∨ 80	4	6	5	5	4	5	29

Zastosowanie wody jako cieczy roboczej wymaga pewnych zmian konstrukcyjnych elementów i innego doboru materiałów niż w przypadku stosowania olejów. Można podać następujące zalecenia odnośnie do zastosowania wody. A więc temperatura pracy układu powinna obejmować zakres od 5 do 70°C. W przypadkach szczególnych górna granica może być zwiększona maksymalnie o 25°C. Efektywność stosowania wody może być uwidoczniiona

Tablica 1.6. Podstawowe dane techniczne olejów mineralnych różnego przeznaczenia bez dodatków polepszających własności (wskaznik jakości poniżej 20 — wg kryteriów tabl. 1.5) [54]

Przeznaczenie	Nazwa lub symbol oleju	Łepkość cSt w temperaturze °C					Punkt aniliniowy	Temperatura °C			Wskaźnik lepkości
		-10	+20	+50	+100			zapłonu (nie mniej)	krzepnięcia (nie więcej)		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Przemysłowe PM	maszynowy 8 (wrzecion 2) maszynowy 10 (wrzecion 5) MWP 26Z (3Z) — zawiera depresator	— — ok. 250 ok. 5000	ok. 30 ok. 40 ok. 55 ok. 250	8-10 10-14 6,3-8,5 26-36	ok. 3 ok. 3,5 ok. 2,5 —	ok. 80 ok. 80 ok. 70 —	120 160 130 170	+5 +5 -60 -25	ok. 40 ok. 40 ok. 40 ok. 35		
Sprężarkowe Sp	WZ-4 TZ-2 TZ-3 TZ-4	ok. 200 ok. 800 ok. 3000 ok. 7000	28-36 >ok. 60 >ok. 120 >ok. 200	ok. 9-10 > 13,4 19-28 28-36	ok. 2,8 >ok. 3,5 >ok. 4,5 >ok. 5,8	ok. 64 ok. 75 ok. 75 ok. 75	145 155 170 180	-45 -50 -30 -30	ok. 60 >60 >60 >60		
Elektroizolacyjne EL	Transformatorowy	ok. 160	<30	<10	ok. 2,5	ok. 70	135	-35	ok. 60		
Technologiczne Tc	Solarowy	ok. 140	10-20	ok. 8	ok. 2,6	ok. 70	125	-20	ok. 60		
Turbinowe Tu	T-20 (T3) T-30 (T4) T-40 (T6) SD-10	ok. 3000 ok. 5000 ok. 8000 —	ok. 170 ok. 250 ok. 250 ok. 600	20-25 30-35 40-50 60-90	ok. 5,2 ok. 5,8 ok. 6,8 ok. 17	ok. 75 ok. 80 ok. 87 ok. 70	180 185 195 200	-5 -5 -5 +5	>60 >60 >60 >45		

Tablica 1.7. Zestawienie olejów według zbliżonych wartości lepkości w temperaturze 50 i 100°C [54]

Klasa	Nazwa olejów				
Bardzo gęste	Transol 190	Hipol 30	MS 20		
	Transol 130	Hipol 15	Lux 13		
Gęste	Hydrol 70	Hipol 10	Transol 80	Lux 10	Lux (dw)
Półgęste	Hydrol 50	Transol 40	Lux 7		
Półpłynne	Hydrol 40	Lux 5	turbinowy T-6		
Płynne	Hydrol 30	turbinowy T-4	sprężarkowy TZ-4		
Bardzo płynne	Hydrol 20	maszynowy 3-Z	sprężarkowy TZ-3	turbinowy T-3	
Ekstra płynne	Hydrol 10	AMG-10	wrzecionowy 5	sprężarkowy WZ-4	sprężarkowy TZ-2
	AMG 10	transformatorowy	wrzecionowy 2	przemysłowy MWP	solarowy

przede wszystkim tam, gdzie istnieje źródło wody pod ciśnieniem. Toteż wybór wody jako cieczy do układów hydraulicznych jest ograniczony zarówno względami temperaturowymi, jak również warunkami i możliwościami systemu technicznego, w skład którego wchodzi układ. W wielu przypadkach jako płyn roboczy jest wykorzystywana para wodna.

Emulsje olejów w wodzie (zawartość oleju od 1 do 10%). Mają one większą smarowność niż czysta woda, dobre własności lepkościowe (lepkość duża, zależna od zawartości oleju, oraz korzystny przebieg funkcji lepkość-temperatura, zbliżony do wody). Po okresach dłuższego postoju woda może oddzielić się, ale mieszana — szybko emulguje.

Emulsje wody w oleju zawierają od 40 do 50% wody. Smarowność takiej emulsji zawiera się między smarownością olejów mineralnych a smarownością emulsji oleju w wodzie.

Roztwór poliglikolu w wodzie zawiera od 35 do 60% wody, ponadto również składniki poprawiające smarowność i odporność na korozję. Własności smarne są dobre i nie ustępują olejom mineralnym. Lepkość wzrasta ze zmniejszeniem udziału wody i można ją dobrać odpowiednio do warunków pracy. Nie można jednak tutaj

stosować olejów jako dodatków, ponieważ mają ujemne własności. Jedną z najlepszych cieczy typu wodoglikoli jest ciecz niepalna Houghto-Safe 271, produkowana w Anglii przez firmę Edgar Vaughan. Wskaźnik lepkości tej cieczy wynosi 150, gęstość $1,055 \text{ g/cm}^3$.

Ciecze syntetyczne. Największe zastosowanie znalazły obecnie ester kwasu fosforowego i ciecze krzemooorganiczne. Temperatura pracy cieczy na estrach wynosi 150°C . Dobrze rozpuszcza się w nich woda i oleje mineralne. Własności są na ogół zbliżone do własności olejów mineralnych z wyjątkiem gęstości, która wynosi ok. $1,3 \text{ g/cm}^3$. Ciecze krzemooorganiczne (silikonowe) mają bardzo korzystny przebieg zależności lepkość-temperatura, mniejszą smarność i są stosunkowo drogie. Zastosowanie ich jest celowe w przypadku, gdy chodzi o uzyskanie wysokich wskaźników lepkości w niskich (od -50°C) i wysokich temperaturach pracy (powyżej 100°C).

Tablica 1.8. Oleje zalecane i zastępcze do urządzeń hydraulicznych [54]

Warunki otoczenia		Minimalna temperatura rozruchu urządzenia	Oleje zalecane	Oleje zastępcze	
				równoważne	gorsze
w budynku		20 10 ÷ 20	Hydrol 70 Hydrol 40	Hipol 10 Transol 80	Lux 10; Lux 7 Lux; turbinowy T-6
		5 ÷ 10	Hydrol 30	Transol 40 —	Lux 7 turbinowy T-4; sprężarkowy TZ-4; przemysłowy 3-Z
Na wolnym powietrzu	lato	20 10 ÷ 20	Hydrol 50 Hydrol 30 Hydrol 40	Transol 40 —	Lux 7; Lux 10 turbinowy T-4; sprężarkowy Tz-4; przemysłowy 3-Z;
		5 ÷ 10	Hydrol 10 Hydrol 20	—	Lux 5 turbinowy T-3 i T-2; sprężarko- wy WZ4, TZ-3; przemysłowy MWP Wrzecion 2
	zima	0 ÷ 5	Hydrol 10	—	przemysłowe: Wrzecion 2; Wrze- cion 5; sprężarko- we WZ4, TZ-3
		-10 ÷ 0	AMG 10 Hydrol 10	—	przemysłowy MWP, sprężarko- wy W 24
		-10	AMG 10	—	przemysłowy MWP

Tablica 1.9. Zamienniki zagraniczne dla krajowych olejów hydraulicznych [54]

Oleje krajowe	Zamienniki zagraniczne o zbliżonej jakości
Hydrol 10	Shell Tellus 15
Hydrol 20	Shell Tellus 27; Mobil DTE Light; Mobil DTE 23; Mobil Fluid 120; BP Energol HL65; Castrol Hyspin 80
Hydrol 30	Shell Tellus 29; Mobil Delvac 1120; BP Energol HL100; Energol HP20; Castrol Hyspin 100
Hydrol 40	Shell Tellus 33; Mobil DTE Heavy Medium; BP Energol 30
Hydrol 50	Shell Tellus 33; Shell Tellus 41; Mobil DTE 103
Hydrol 70	Shell Tellus 69; Shell Tellus 72; Mobil DTE Extra Heavy

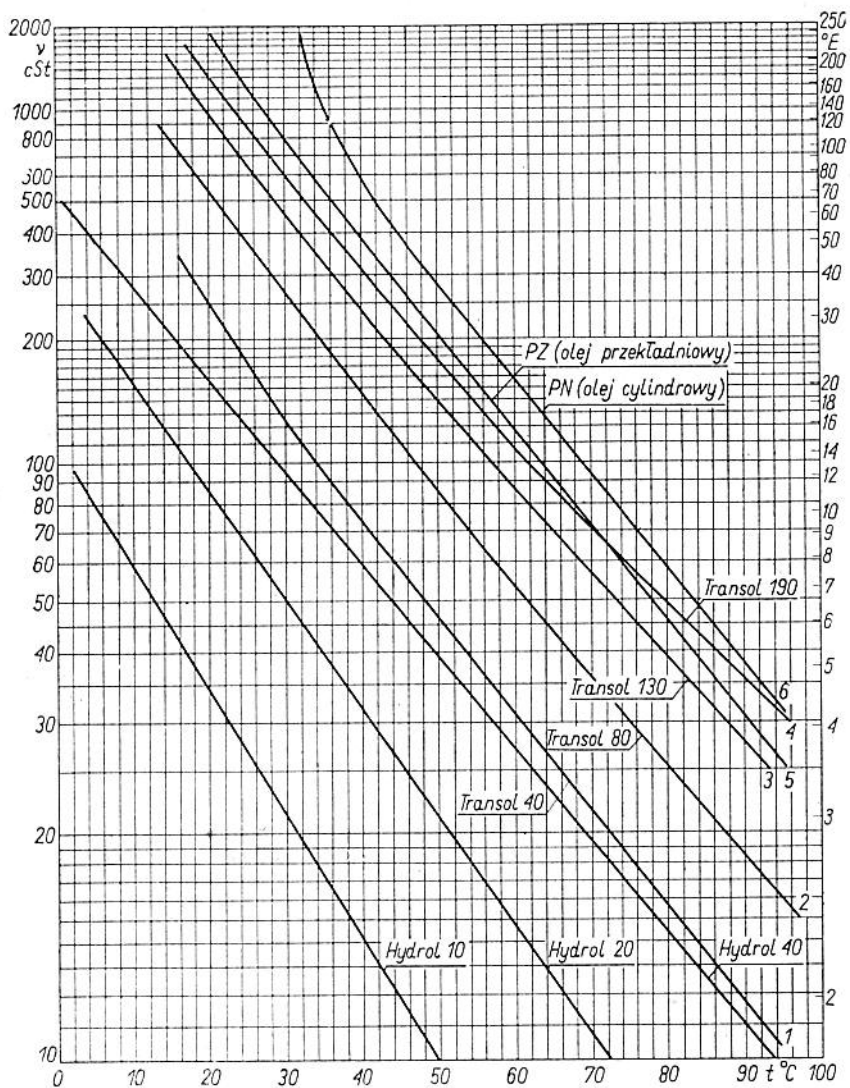
Uwaga: w pierwszej kolejności oleje Shell Tellus należy uznać za równorzędne. W przypadku gdy zachodzi konieczność stosowania zamienników zagranicznych wyższej jakości zaleca się stosować oleje Shell Tellus ze znakiem „T” lub „HD” odpowiedniej lepkości.

Węgliki fluoru mimo dobrych własności są rzadko stosowane ze względu na wysoką cenę.

Oleje syntetyczne, których zakres temperatury pracy jest przesunięty na ogół w górę (do ok. 200°C) mają między innymi tę wadę, że jako bardzo płynne tworzą cienkie warstwy smarne. Wymaga to bardzo gładkich powierzchni i bardzo dokładnych filtrów, co w konsekwencji podraża koszty eksploatacji. Niemniej jednak wysokie wskaźniki lepkości olejów syntetycznych (np. olejów silikonowych) mogą skłonić do przypuszczeń, że w dalszej fazie rozwoju urządzeń hydraulicznych znajdą one szerokie zastosowanie. Ciecze silikonowe spełniają w głównej mierze wszystkie wymagania ogólne i techniczne stawiane cieczom roboczym i powinny być w zasadzie stosowane w pierwszej kolejności. Pewnym ograniczeniem w obecnym czasie jest mała produkcja olejów silikonowych oraz brak tradycji.

Związki chlorowane. Ze względu na wiele wad, takich jak tendencja do hydrolizy z wydzielaniem się kwasu solnego, mały zakres temperatur pracy, niskie wskaźniki lepkości itd., są stosowane bardzo rzadko jako użyteczne ciecze robocze.

Ciekłe metale. Wykorzystanie ciekłych metali jako cieczy roboczych umożliwi rozszerzenie zakresu zastosowania urządzeń sterujących, głównie na dziedzinę obejmującą trudne warunki temperaturowe i promieniowania aktywnego. Wysokie tempera-



Rys. 1.6. Przykładowe zależności lepkości od temperatury niektórych olejów mineralnych używanych w Polsce

Tablica 1.10. Podstawowe dane techniczne wody

Parametry	Woda		
	zwykła	ciężka	superciężka
Gęstość kg/dm ³ (w temperaturze)	0,9999977 do 1,0000024 (4°C)	1,1059 ¹⁾ (20°C) —	1,33 (20°C) —
Temperatura zamarzania, °C	0,00	+3,8	+9
Temperatura wrzenia, °C	100,00	101,4	104

¹⁾ Największą gęstość ma woda ciężka w temperaturze +11°C.

Tablica 1.11. Ciężar właściwy, lepkość i napięcie powierzchniowe wody w różnych temperaturach

Temperatura °C	Gęstość ¹⁾ kg/dm ³	Lepkość		Napięcie powierzchniowe dyn/cm
		dynamiczna mP	kinematyczna cSt	
0	999,9	17,92	1,792	75,64
10	999,7	13,08	1,308	74,22
20	998,2	10,05	1,007	72,75
30	995,7	8,01	0,804	71,18
40	992,2	6,56	0,661	69,56
50	988,1	5,49	0,556	67,91
60	983,2	4,69	0,477	66,18
70	977,8	4,06	0,415	64,42
80	971,8	3,57	0,367	62,61
90	965,3	3,17	0,328	60,75
100	958,4	2,84	0,296	58,85

¹⁾ W temperaturze 3,98°C równa 1,000 kg/dm³.



Rys. 1.7. Typowe zależności lepkości od temperatury cieczy roboczych o różnym składzie chemicznym; 1, 1' — górny i dolny zakres dla oleju silikonowego, 1'' — olej silikonowy DC 200/50, 2 — mieszanina poliglikolu i wody, 3 — emulsja wody w oleju, 4 — chlorowane estry fosforowe, 5, 5' — górny i dolny zakres dla oleju mineralnego, 5'' — olej mineralny OM15

tury powyżej 300°C stwarzały poważne kłopoty eksploatacyjne dla urządzeń hydraulicznych, zaś urządzenia pneumatyczne nie zawsze mogły sprostać wysokiemu wymaganiu dynamiki ze względu na ściśliwość gazów. Najczęściej stosowanym ciekłym metalem jest stop eutektyczny sodu i potasu NaK-77. Z wyglądu przypominający rtęć, stop ten ma bardzo małą gęstość oraz dobre własności mechaniczne. W układach szczelnych bez dostępu powietrza (tlenu) eutektyka sodowo-potasowa jest najbardziej stabilną chemicznie cieczą hydrauliczną.

Dodatkowe zalety w postaci stabilności radioaktywnej umożliwiają stosowanie tej cieczy w zespołach sterujących obiektów o napędzie jądrowym lub znajdujących się pod wpływem różnorodnego napromieniowania w przestrzeni kosmicznej. Z pozostałych zalet tego stopu, jak również wielu innych stosowanych ciekłych metali, należy wymienić bardzo wysoką przewodność cieplną. Powoduje to zmniejszenie się zużycia współpracujących części przy wysokich temperaturach ze względu na szybkie odprowadzenie ciepła od nagranych miejsc styku. Niska (patrz tabl. 1.12) lepkość większości ciekłych metali wpływa na konieczność projektowania specjalnych uszczelnień elementów ruchomych oraz np. zmniejszania luzów w zespołach par precyzyjnych elementów suwakowych.

Trudności występujące przy projektowaniu urządzeń sterujących pracujących w wysokich temperaturach na ciekłym metalu, jak i na konwencjonalnych cieczach hydraulicznych są podobne. Ciekłe metale nie stwarzają istotnych problemów konstrukcyjnych ze względu na przybliżone parametry hydrodynamiczne w grupie cieczy o tej samej lepkości. Istotną trudność powoduje fakt małej smarowności, co wymaga projektowania wyjątkowo trudnych technologicznie i materiałowo łożysk i uszczelnień. Małe luzy części współpracujących przy dużej gładkości powierzchni powodują m. in. tendencję do trwałego połączenia dyfuzyjnego oraz dużą wrażliwość na zmiany geometryczne.

Przy podsumowaniu wszystkich zalet i wad stosowania ciekłych metali, mają jednak przewagę zalety i dlatego też wykorzystanie ciekłych metali w nowoczesnej technice budowy maszyn jest coraz większe. Prowadzone badania mają na celu poznanie korelacji cech fizyko-chemicznych ciekłych metali i dobór odpowiednich materiałów konstrukcyjnych. Ponadto istotne znaczenie ma również opracowanie stopu o dobrych własnościach, charakteryzującego się zarówno niską temperaturą krzepnięcia, jak i wysoką temperaturą wrzenia.

Gazy robocze. Najbardziej rozpowszechnionym gazem stosowanym w urządzeniach płynowych jest *powietrze*. Powietrze, jak również i wszelkie gazy, odznacza się dużą ściśliwością. Zmiana

Tablica 1.12. Dane techniczne metali stosowanych jako ciecze robocze

Ciecz	Temperatura topnienia °C	Gęstość g/cm ³ w temp. °C	Lepkość cP w temp. °C	Przewodność cieplna kcal/(cm·s·K) w temp. °C	Opór właściwy μΩ·cm w temp. °C
Hg	-38,9	13,35; 100 12,88; 300	1,85; -20 1,01; 200	0,0196; 0 0,0303; 220	98,4; 50 127,5; 300
Na Cs 96	-28				
NaK77	-12	0,875; 20 0,700; 700			
NaK78	-11,1	0,847; 100 0,729; 400	0,468; 103,7 0,205; 400	0,058; 100 0,064; 400	410; 100 47,0; 200
NaK44	19	0,886; 100 0,814; 400	0,546; 103,7 0,230; 400	0,0617; 100 0,0662; 400	35,5; 100 41,0; 200
Cs	28,5	1,9; 20			
Rb	38,5	1,5; 20			
K	63,7	0,86; 20	0,515; 69		
Na	97,8	0,927; 100 0,833; 500	0,682; 100 0,239; 500	0,205; 100 0,159; 500	9,675; 100 20,025; 400

gęstości gazów roboczych pod wpływem ciśnienia i temperatury wpływa na ogół niekorzystnie na własności dynamiczne urządzeń pneumatycznych. Dlatego też zakres stosowanych ciśnień roboczych takich urządzeń jest mały w stosunku do zakresu ciśnień wykorzystywanych w urządzeniach hydraulicznych. Oprócz tych wad, gazy robocze, a szczególnie powietrze, ze względu na dostępność,

Tablica 1.13. Podstawowe własności fizyczne suchego i czystego powietrza przy ciśnieniu 1 kg/cm² [113]

Temperatura °C	Gęstość kg/m ³	Pojemność cieplna kcal/(kg·K)	Przewodność cieplna kcal/(m·h·K)	Lepkość dynamiczna 10 ⁶ kg·s/m ²	Lepkość kinematyczna 10 ⁶ m ² /s
-50	1,532	0,239	1,76	1,482	9,490
-20	1,350	0,240	1,96	1,647	11,97
0	1,251	0,240	2,096	1,753	13,75
10	1,207	0,240	2,16	1,804	14,66
20	1,166	0,240	2,22	1,855	15,61
30	1,127	0,240	2,28	1,905	16,58
40	1,091	0,240	2,34	1,954	17,57
50	1,057	0,240	2,40	2,002	18,58
60	1,026	0,241	2,46	2,050	19,60
70	0,996	0,241	2,51	2,097	20,65
80	0,967	0,241	2,57	2,143	21,74
90	0,941	0,241	2,63	2,189	22,82
100	0,916	0,241	2,68	2,233	23,91
120	0,869	0,242	2,79	2,322	26,21
140	0,827	0,243	2,90	2,408	28,66
160	0,789	0,243	3,00	2,492	31,01
180	0,754	0,244	3,11	2,574	33,49
200	0,7220	0,245	3,22	2,652	36,03
250	0,6530	0,247	3,49	2,846	42,75
300	0,5960	0,250	3,76	3,030	49,87
350	0,5483	0,252	3,99	3,204	57,33
400	0,5075	0,255	4,22	3,374	65,22
500	0,4418	0,261	4,69	3,686	81,85
600	0,3912	0,266	5,14	3,982	99,86
700	0,3510	0,271	5,56	4,256	118,95
800	0,3183	0,276	6,02	4,516	139,18
900	0,2916	0,280	6,36	4,760	160,14
1000	0,2683	0,283	6,74	4,996	182,67
1100	0,2487	0,286	7,10	5,221	205,94
1200	0,2319	0,289	7,45	5,441	230,17

są wykorzystywane w szerokim zakresie w technice sterowania oraz w urządzeniach siłowych. Często stosowane w urządzeniach plynowych są takie gazy, jak azot, para wodna i pary innych cieczy. Ze względu na procesy technologiczne oraz napędy, w których to dziedzinach technicznych występują gazy (np. acetylen, gaz świetlny, gazy spalinowe silników tłokowych, odrzutowych czy też raketowych), są budowane urządzenia sterujące i urządzenia wykonawcze z wykorzystaniem tych gazów jako plynów roboczych.

Teoretycznie każdy gaz chemicznie obojętny (ze względu na trwałość elementów konstrukcyjnych) i nietoksyczny może być wykorzystany jako czynnik roboczy. W praktyce jednak z wyjątkiem kilku nietypowych przypadków (stosowanie gazów spalinowych w niektórych pociskach raketowych lub azotu w układach wysokociśnieniowych — ze względu na bezpieczeństwo) stosuje się powietrze o ciśnieniu $4\div 7$ kG/cm². Jest to uzasadnione wieloma korzyściami wynikającymi z przyjęcia takiego właśnie rozwiązania, a mianowicie: taniością i prostotą konstrukcji, trwałością i niezawodnością działania, łatwością konserwacji i remontów układu, elastycznością w dostosowaniu się do warunków pracy, bezpieczeństwem przeciwpożarowym.

Jak wynika z powyższych danych, przeprowadzenie podziału gazów jako plynów roboczych nie jest spowodowane koniecznością.

Dane fizyczne podstawowych gazów roboczych są zawarte w tabl. 1.13 i 1.14.

W tabl. 1.13 podano podstawowe parametry powietrza, które

Tablica 1.14. Lepkość dynamiczna różnych gazów 10⁻⁶kG·s/m² [113]

°C	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂	Powietrze z 13% CO ₂ zawierające H ₂ O w %			
					5	11	17	23
0	1,411	0,833	1,698	1,980	1,663	1,608	1,5533	1,496
100	1,880	1,231	2,141	2,508	2,139	2,077	2,018	1,967
200	2,304	1,635	2,525	2,966	2,557	2,495	2,435	2,373
300	2,691	2,039	2,870	3,375	2,935	2,877	2,819	2,762
400	3,048	2,436	3,180	3,748	3,283	3,228	3,173	3,118
500	3,379	2,825	3,471	4,091	3,598	3,548	3,498	3,445
600	3,690	3,206	3,736	4,411	3,904	3,858	3,812	3,765
700	3,982	3,578	3,986	4,712	4,187	4,146	4,105	4,063
800	4,256	3,940	4,220	5,095	4,454	4,419	4,384	4,353
900	4,521	4,292	4,445	5,260	4,707	4,677	4,644	4,616
1000	4,770	4,633	4,663	5,517	4,952	4,927	4,897	4,878
1100	5,010	4,969	4,867	5,765	5,187	5,166	5,140	5,125
1200	5,240	5,296	5,066	6,001	5,415	5,399	5,377	5,361

są wykorzystywane w obliczeniach urządzeń aerodynamicznych, a w tym również i filtrów powietrza, a w tabl. 1.14 — lepkość dynamiczną innych gazów.

1.2.4. Wymagania stawiane cieczom roboczym

Układy płynowe zastępują tradycyjne układy mechaniczne lub elektryczne. Ze względu na stosunkowo łatwą sterowalność układów płynowych, szczególnie układów hydraulicznych charakteryzujących się szybką reakcją elementów, układy takie są wyjątkowo wygodne w realizacji ruchów postępowo-zwrotnych.

W układzie hydrostatycznym ciecz spełnia rolę elementu przenoszącego siły poprzez „statyczne” jej połączenie z elementami mechanicznymi, w układzie hydrokinetycznym — poprzez własną energię kinetyczną.

Dla układów hydraulicznych, podstawowym wymaganiem jest nieściśliwość cieczy oraz taka jej płynność, aby możliwe było wydajne przekazywanie mocy przy najmniejszych stratach. W związku z tym ciecz powinna mieć takie parametry techniczne, aby spełnione były możliwie najdokładniej ogólne wymagania wynikające ze specyfiki pracy układu hydraulicznego.

W odniesieniu do cieczy stosowanych w układach hydraulicznych wymagania te są następujące:

- ciecz powinna mieć gęstość niezbyt wysoką, aby zanieczyszczenia w czasie przechowywania cieczy mogły swobodnie opadać na dno zbiornika, oraz aby zmniejszyć oddziaływania sił bezwładności;

- ciecz powinna być odporna na zmiany temperatury; spełniają to ciecze o wysokim wskaźniku lepkości; lepkość cieczy powinna nieznacznie zmieniać się ze zmianą temperatury, aby przy zmianie warunków pracy (temperatury i ciśnień) nie zakłócać pracy urządzenia;

- ciecz powinna mieć szeroki zakres temperatur roboczych, co zapewnia wysoka temperatura zapłonu oraz niska temperatura krzepnięcia;

- ciecz powinna zachowywać stałe i dobre własności smarne w całym zakresie temperatur, w jakim może się znaleźć podczas eksploatacji; również adhezja powinna być taka, aby nie występowało zjawisko kawitacji;

- ciecz powinna zachowywać jednorodność struktury w czasie przechowywania, transportu oraz eksploatacji; stabilność strukturalna jest własnością zmniejszającą szybkość starzenia się cieczy;

- ciecz nie powinna wydzielać par szkodliwych dla otoczenia

oraz nie powinna być trująca;

— ciecz nie powinna zawierać ciał stałych mogących zakłócić pracę urządzenia;

— ciecz nie powinna powodować korozji części metalowych, ani niszczenia elementów uszczelniających;

— ciecz powinna być odporna na działanie mechaniczne; szczególnie na duże dławienie i ciśnienie;

— ciecz powinna mieć jak najmniejsze skłonności do tworzenia piany; na powstawanie piany mają wpływ: wadliwa konstrukcja układu (podciśnienie, nieszczelność przewodów, duża cyrkulacja w zbiorniku itp.), obecność powietrza rozpuszczonego w cieczy, zmiany ciśnienia oraz niektóre stałe zanieczyszczenia;

— ciecz powinna mieć jak najmniejsze skłonności do wchłaniania płynów (powietrza, innych gazów, wody). Zawartość tych domieszek powoduje intensyfikację procesu starzenia się cieczy i wywołuje korozję; ponadto zawartość gazów w stanie nierozpuszczonym powoduje nierównomierność pracy wskutek zmian ścisłości i innych parametrów fizycznych;

— ciecz powinna przeciwstawiać się powstawaniu zmętnień na skutek wydzielin krystalicznych, emulsji wodnej, krótkotrwałych wysokich temperatur, dużych turbulencji itp.;

— ciecz powinna mieć odpowiednie własności elektryczne i magnetyczne; ciecz robocza powinna być dielektrykiem; pożądane są własności antymagnetyczne lub stałe własności magnetyczne nawet na skutek zanieczyszczeń oraz domieszek;

— ciecz powinna charakteryzować się łatwością oczyszczania; możliwością ulepszenia;

— ciecz powinna odpowiadać względem ekonomicznym, tzn. powinna mieć taką cenę, aby zapewniała ekonomiczność pracy urządzenia przy spełnianiu wymagań stawianych podczas pracy.

Wymagania techniczne określają te wartości parametrów płynu roboczego, które są niezbędne dla właściwej pracy urządzenia, z drugiej strony powinny być takie, aby charakteryzowały ciecz roboczą i były łatwe do określenia. Do podstawowych parametrów określanych przez warunki techniczne należą: gęstość czynnika, lepkość kinematyczna dla dwu, trzech lub czterech różnych temperatur (np. -10 , $+20$ i $+50^{\circ}\text{C}$), temperaturowe punkty charakterystyczne, zawartość domieszek i dodatków (inhibitor utleniania i korozji, dodatki poprawiające wskaźnik lepkości, własności smarne, dodatki przeciwpieniące i przeciwemulgujące, depresator) oraz inne.

Przedstawione wyżej wymagania ogólne oraz względy fizykochemiczne cieczy prowadzą do wysunięcia następujących wniosków i zaleceń w zakresie stosowania cieczy roboczych:

1. Zadawalające działanie urządzenia zależy nie tylko od prawidłowo zaprojektowanego obwodu, ale również od sprawnego działania wszystkich elementów, w tym i od rodzaju stosowanej cieczy. Ciecz musi być uważana za równorzędny element składowy urządzenia, konieczny dla jego poprawnego działania.

2. Projektowanie układu hydraulicznego musi opierać się na znajomości średniej lepkości cieczy roboczej. Poszczególne elementy obwodu muszą mieć taką tolerancję, aby w dozwolonym zakresie temperaturowym było zapewnione sprawne działanie urządzenia w jak najdłuższym okresie czasu.

3. Opór przepływu i tarcie wewnętrzne cieczy spowodowane lepkością muszą być takie, aby straty energii (m. in. wydzielanie się ciepła) były jak najmniejsze. Z tego powodu teoretycznie najlepiej używać olejów ekstra płynnych. Praktycznie ograniczenia istnieją ze względu na przecieki (uwarunkowane szczelnością elementów obwodu) i smarowanie. Należy więc używać oleju dość płynnego, aby umożliwić swobodne jego krążenie w obwodzie, a zarazem dość gęstego, aby zapewnić największy współczynnik sprawności (jak najmniejsze przecieki).

4. Z chwilą uzyskania temperatury krzepnięcia, lepkość danej cieczy rośnie nieskończenie. Wzrost lepkości dla tych samych różnic temperatur jest większy bliżej temperatury krzepnięcia. Dla scharakteryzowania „czułości” na zmiany temperatur cieczy wprowadzono wskaźnik lepkości (Dean i Davis). Im wyższy jest ten wskaźnik lepkości, tym mniejszy spadek lepkości wykazuje dany olej w miarę wzrostu temperatury i odwrotnie. Posługiwanie się wskaźnikiem lepkości umożliwia natychmiastową ocenę podstawowych własności cieczy przeznaczonych do pracy w trudnych warunkach. Dlatego też jest wskazane, aby wszystkie typy cieczy hydraulicznych miały podany wskaźnik lepkości.

5. Najbardziej racjonalną ze wszystkich dotychczasowych metod wyznaczania „czułości” lepkościowo-temperaturowej jest metoda współczynnika temperaturowego (Wilcock) uwzględniająca również konkretną wartość lepkości w określonych temperaturach. Warto się zastanowić, czy stosowanie tej metody jest bardziej uzasadnione i czy nie lepiej byłoby posługiwać się tym współczynnikiem.

6. Bardzo istotną cechą cieczy jest smarność i przyczepność. Ciecz jest tym lepsza, im bardziej jest zdolna tworzyć na powierzchni metalu bardzo cienką błonę smarującą, szczególnie gdy na powierzchni tarcia działa wielkie ciśnienie i gdy występują nierówności powierzchni. Istnieją specjalne dodatki przeciwcierne, które uniemożliwiają przebicie błony smarującej nawet przy dużych ciśnieniach lokalnych. Tworzą one dodatkową cienką błonę,

chemicznie połączoną z metalem, w przypadku zaistnienia niebezpiecznie wysokich ciśnień i temperatur.

7. Zawartość wody i powietrza w olejach mineralnych prowadzi do tworzenia emulsji i piany. Zjawiska te są przyczyną nierównomiernej pracy elementów układu hydraulicznego i ich nadmiernego nagrzewania się. Należy opracować metody kontroli powstawania piany w obwodzie oraz jej usuwania.

8. Obecność wody w obwodzie hydraulicznym nie przystosowanym do tej ewentualności może doprowadzić do korozji części metalowych (szczególnie stalowych). Korozja układu hydraulicznego może doprowadzić do wielkich strat, a zatem należy wprowadzić specjalne dodatki (np. wchłaniacze) chroniące metal przed działaniem czynnika korodującego.

9. Do wyznaczenia zawartości węglowodorów aromatycznych służy *punkt anilinowy*, określający najniższą temperaturę, w której olej rozpuszcza się klarownie w takiej samej ilości suchej aniliny. W obecności tych węglowodorów następuje rozpuszczenie, napęcznienie i zmiękczenie uszczelkek szczególnie z kauczuku naturalnego, częściowo syntetycznego i innych materiałów uszczelniających. Węglowodory parafinowe mają bardzo małe „właściwości łączenia” oleju, co obniża smarność, podwyższa zaś wskaźnik lepkości.

10. Węglowodory wchodzące w skład oleju mogą ulec przemianom chemicznym pod wpływem ciepła i tlenu zawartego w powietrzu. Proces utleniania może przebiegać szybciej na skutek działania katalizacyjnego niektórych metali (szczególnie miedzi). Prowadzi to do starzenia się oleju. Należy zatem dokładnie wyznaczyć czas stabilności chemicznej, obserwując i prowadząc analizę chemiczną oleju z uwzględnieniem warunków pracy (temperatura, ciśnienie, zanieczyszczenie).

11. Każdą z podstawowych własności oleju należy brać pod uwagę i dążyć do tego, aby te własności były optymalne. Niektóre parametry mogą być poprawione przez zastosowanie dodatków, inne przez przeprowadzenie określonych zabiegów technologicznych. Należy jednak zaznaczyć, że dodatki mogą polepszyć jedną własność, a często być przyczyną pogorszenia innych własności. Konieczne jest więc takie ich dozowanie, aby olej mógł jak najlepiej spełniać postawione mu zadanie. Wymaga to jednak żmudnych i długotrwałych prób.

12. Woda jest najtańszym płynem stosowanym w układach hydraulicznych. Ma ona niską smarność oraz powoduje korozję części metalowych. Rozpuszczone w wodzie oleje mineralne poprawiają smarność. Wadą takiego rozwiązania jest powstająca korozja biochemiczna, spowodowana przez fermentację anaerobów w zamkniętym obiegu.

13. Ciecze otrzymane w wyniku syntezy są coraz częściej

stosowane w układach hydraulicznych. Zastosowanie swoje zawdzięczają na ogół niskiej temperaturze krzepnięcia, dobrej stabilności lepkościowej (wyższy wskaźnik lepkości) oraz okoliczności, że są to najczęściej płyny ognioodporne.

14. Ciecżą najczęściej stosowaną w układach regulacji jest olej mineralny. Dzięki swoim własnościom jest on jednym z najlepszych płynów w zakresie temperatur od $+5$ do 50°C . Dobrze dobrany olej mineralny może znacznie polepszyć sprawność urządzenia.

15. Zanieczyszczenie oleju powoduje z jednej strony konieczność filtrowania, z drugiej zaś — konieczność okresowych przepłukiwań elementów układu. Ma to na celu usunięcie zanieczyszczeń osiadłych w przewodach i komorach roboczych obwodu. Do przepłukiwania obwodu nie można stosować wody (ze względu na korozję), benzyny oraz nafty (uszkodzenia złączy). Należy używać specjalnego oleju o dobrych własnościach czyszczących.

16. W hydraulicznych układach przemysłowych, lepkość oleju powinna się zawierać w zakresie: dolna granica 2 stopni Englera przy 50°C (ze względu na przecieki), górna granica 120 stopni Englera. Powyżej tej górnej granicy lepkości olej nie może być pompowany. W tym zakresie może łatwo wystąpić kawitacja.

17. Własności oleju podczas dłuższej pracy mogą ulegać zmianie. Należy prowadzić okresową kontrolę lepkości i zmiany liczby kwasowej, w celu stwierdzenia oznak starzenia się oleju. Najlepiej jest określić dokładnie warunki techniczne takich prób, wskazujących na możliwość utrzymywania parametrów urządzenia hydraulicznego w ścisłej charakterystyce energetycznej, co stanowi jego przewagę nad innymi urządzeniami, np. elektrycznymi.

18. Istnieje możliwość wyboru między kilkoma typami cieczy roboczych: woda, oleje syntetyczne, oleje mineralne, ciekłe metale. Ciecze pochodzenia syntetycznego, jeśli są ognioodporne, mają zarazem wysoką wydajność i uniemożliwiają powstanie pożaru nawet przy przeciekach lub uszkodzeniach układu.

1.3. Zanieczyszczenia płynów roboczych

1.3.1. Uwagi ogólne i wymagania dotyczące poziomów zanieczyszczeń

Zanieczyszczenia płynów roboczych stanowią kategorię mikro-objektów (ciał stałych, ciekłych), powodujących niesprawności urządzeń płynowych. Ich obecność wpływa zakłócająco na działanie urządzeń płynowych. Typowymi objawami takiego wpływu zanieczyszczeń są zakłócenia przepływu płynu, ścieranie powierzchni

współpracujących ze sobą, niekorzystne zmiany parametrów fizycznych i chemicznych płynów roboczych i elementów składowych urządzenia. W urządzeniach hydraulicznych będą to efekty np. kolmatacyjne i obliteracja szczelin. Najwięcej kłopotów sprawiają mikroobiekty o wymiarach poniżej dziesiątych części milimetra. Z tego względu istnieją trudności w ich identyfikacji oraz usuwaniu. Ponadto ze względu na cechy migracyjne i precypitacyjne (np. strącanie) zanieczyszczeń, występuje konieczność ciągłego zabezpieczenia układu przed niepożądanymi skutkami ich wystąpienia w zwiększonej koncentracji.

Ilościowe wyrażenie występowania (poziomu) zanieczyszczeń w płynie roboczym określa *stopień* lub *klasę czystości płynu*. Istnieją jednak poważne trudności definicyjne ilościowego wyrażenia klasy czystości płynu roboczego. Pierwsza trudność występuje na etapie określenia wymiarów mikroobektu.

Najprostszym rozwiązaniem tego problemu okazuje się podawanie jednego zastępczego wymiaru mikroobektu charakterystycznego dla regularnego kształtu geometrycznego. Istnieje jednak tendencja wyróżniania dwu kategorii kształtu mikroobektów stałych, występujących w płynach roboczych: włóknistych, o dużym stosunku długości do „średnicy” i niewłóknistych, do których zalicza się wszystkie mikroobiekty nie sklasyfikowane jako włókniście.

Drugą trudność sprawia identyfikacja mikroobektów i określenie, które z nich należy traktować jako zanieczyszczenia. Przyjeto, że zanieczyszczeniami są przede wszystkim mikroobiekty znajdujące się w fazie stałej (cząstki stałe) i krążące w układzie razem z płynem roboczym. Nie są zatem zaliczane do zanieczyszczeń np. mikronierówności powierzchni metalowych, które stanowią jedynie potencjalną grupę mikroobektów-zanieczyszczeń. Nie są również klasyfikowane pęcherzyki gazowe w cieczy jako zanieczyszczenia, pomimo istotnie szkodliwego ich wpływu na działanie układu hydraulicznego, aczkolwiek w wielu układach są stosowane urządzenia usuwające gaz z cieczy (*deaerolizatory-aspiratory*). Ponadto nie ma dotychczas żadnych dokumentów precyzujących dolną granicę twardości cząstek, poniżej której cząstki stałe oraz cząstki wykazujące własności wyraźnie reologiczne, nie byłyby zaliczane do zanieczyszczeń.

Wreszcie trzecią, chociaż nie ostatnią, trudność sprawia określenie ilości zanieczyszczeń w płynach roboczych. Uważa się, że najlepszym wskaźnikiem jest podanie koncentracji zanieczyszczeń (szt./jedn. objętości) dla umownych zakresów wymiarowych. Najwygodniejszą formą określania koncentracji cząstek jest przyjęcie podstawowej jednostki objętości. Dla cieczy najczęściej wynosi ona 100 ml, dla gazów 1 m³ w warunkach normalnych.

Niezależnie od określenia koncentracji liczbowej zanieczyszczeń z podziałem na zakresy wymiarowe, klasyfikuje się stopnie czystości według sumarycznej liczby cząstek zanieczyszczeń w jednostce objętości oraz według ciężaru zanieczyszczeń. Te dwie ostatnie klasyfikacje są uważane za pomocnicze przy ocenie stopnia czystości.

Odrębnym zagadnieniem w ocenie czystości głównie cieczy roboczych jest przyporządkowanie ustalonej klasy czystości określonym typom układów hydraulicznych lub też narzucenie warunków technicznych czystości cieczy roboczych w zależności od warunków eksploatacji i przeznaczenia układów hydraulicznych. Względy powyższe doprowadziły na przykład do podziału cieczy i układów lotniczych na 4 typy (The Aerospace Industries Association, ATC Report No. ARCT-28, „Specification for Contamination Control of Hydraulic Fluid”, USA):

- A. ciecz w zbiorniku dostawczym,
- B. układy lotnicze,
- C. układy obsługi (wymiana cieczy z układami lotniczymi),
- D. układy sterujące podstawowe (bez wymiany cieczy z układami lotniczymi).

Niezależnie od występujących trudności w definiowaniu stopnia czystości cieczy roboczych w układach hydraulicznych, opracowano wiele dokumentów klasyfikacyjnych.

Podział na klasy czystości cieczy roboczych stosowanych we wszystkich układach hydraulicznych w USA i Zachodniej Europie jest zawarty w dokumencie Contamination Levels SAE, ASTM and AIA Tentative Standard for Hydraulic Fluids (tabl. 1.15) oraz w normie NAS 1638.

Tablica 1.15. Poziomy zanieczyszczeń cieczy wg SAE, ASTM, AIA Tentative Standard

Zakresy wymiarowe cząstki μm	Liczba cząstek w 100 ml dla klas zanieczyszczeń							
	0	1	2	3	4	5	6	7-10
2,5-5	nie limitowany							
5-10	2700	4600	9700	24000	32000	87000	128000	
10-25	670	1340	2680	5360	10700	21400	42000	
25-50	93	210	380	780	1510	3130	6500	
50-100	16	28	56	110	225	430	1000	
> 100	1	3	5	11	21	41	92	
liczba całkowita cząstek	3480	6181	12821	30261	44456	112001	177592	

Najbardziej szczegółowym dokumentem klasyfikującym poziomy zanieczyszczeń jest Narodowa Norma Lotnicza (National Aerospace Standard) 1638 wydana przez Aerospace Industries of America Incorporated (USA) (tabl. 1.16). Progresja od klasy 00 do klasy 12 jest uzyskana dla każdej klasy w zasadzie przez podwojenie dopuszczalnej liczby zanieczyszczeń z poprzedniej klasy.

Zakresy według NAS 1638 zostały już powszechnie przyjęte w przemyśle lotniczym i hydrauliki siłowej w USA i Anglii. Liczba cząstek w każdym zakresie wymiarów danej klasy jest oparta na liczbie oczekiwanej w przeciętnym układzie hydraulicznym. Taki stosunek zanieczyszczeń można zaobserwować w dużych próbkach cieczy spuszczonej z układów hydraulicznych.

Układ taki ma przeważającą liczbę małych cząstek, będących produktem zużycia współpracujących ze sobą części lub erozji powstałej przy dużych prędkościach cieczy. Poziom zanieczyszczeń utrzymujący się w układzie hydraulicznym naziemnym jest w przybliżeniu o jedną klasę według NAS 1638 niższy niż w układzie hydraulicznym lotniczym. Stąd mniej surowe kryteria czystości dla hydraulicznych układów naziemnych.

Normy NAS 1638 są bardziej uznane niż klasyfikacja SAE, ASTM, ATA Tentative Standard. Klasa zanieczyszczeń NAS 1638 przewyższa klasę Tentative Standard o 3 jednostki dla takiego samego w przybliżeniu poziomu, tzn. klasa 8 według NAS 1638 odpowiada w przybliżeniu klasie 5 według Tentative Standard.

Wadą dotychczasowych klasyfikacji jest ściśle określanie ilości cząstek dla wielu zakresów wymiarowych, tak że wiele cieczy, w których ogólna liczba cząstek odpowiada danej klasie, a liczba cząstek w poszczególnych zakresach wymiarowych odbiega od podanych w normach, sprawia iż nieraz trudno ją zaliczyć do jednej z podanej w normach klasy.

W zakresie „normalizacji” czystości gazów roboczych dokonano niewiele. Trudno podać przyczynę takiego stanu rzeczy. Istniejące dotychczas zalecenia obejmują stosunkowo wąską gałąź urządzeń gazowych, a zakres wymagań dotyczących poziomów zanieczyszczeń nie jest wyraźny i jednoznaczny. Zajmiemy się zatem tą dziedziną zastosowań, w której gazy robocze są przeznaczone do zasilania pneumatycznych urządzeń sterujących i napędowych. Przeznaczenie gazu roboczego i wartości parametrów technicznych są najczęściej kryterium podziału określającego z kolei wymagania techniczne. Rozróżnia się najczęściej następujące rodzaje urządzeń pneumatycznych:

— *urządzenia sterujące niskiego, średniego i wysokiego ciśnienia* (zawierające również czysto mechaniczne elementy ruchome);

Tablica 1.16. Poziomy zanieczyszczeń w cieczy wg NAS 1638

Zakres wymiarów cząstki μm	Liczba cząstek w 100 ml dla klas zanieczyszczeń													
	00	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5- 15	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	32000	64000	128000	256000	512000	1024000
15- 25	22	44	89	178	356	712	1425	2850	5700	11400	22800	45600	91200	183000
25- 50	4	8	16	32	63	126	253	506	1012	2025	4050	8100	16200	32400
50-100	1	2	3	6	11	22	45	90	180	360	720	1440	2880	5760
ponad 100	0	0	1	1	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1024

— urządzenia sterujące strumieniowe (bez czysto mechanicznych elementów ruchomych);

— urządzenia pneumatyczne napędowe;

— urządzenia sterujące i napędowe wysokotemperaturowe (na tzw. „gorące gazy”).

Do podstawowych parametrów technicznych gazów roboczych zalicza się ciśnienie zasilania (dla urządzeń sterujących średniego ciśnienia wynosi ono 1,4; 2,5; 4,0; 6,0; 8,0; oraz 10 kG/cm²), dopuszczalne zakresy prędkości przepływu, temperaturę, skład chemiczny fazy podstawowej oraz zawartość zanieczyszczeń (domieszek cieczy, ciał stałych, par i innych gazów). Poniżej przedstawiono dane dopuszczalnych zawartości domieszek (zanieczyszczeń różnego rodzaju) w powietrzu stosowanym jako gaz roboczy w urządzeniach sterujących niskiego, średniego i wysokiego ciśnienia:

1) nie dopuszcza się zawartości wody w postaci kropeł, a w postaci pary dopuszcza się pod warunkiem, że punkt rosy powietrza przy ciśnieniu roboczym znajduje się co najmniej o 10°C poniżej najniższej temperatury eksploatacji urządzenia;

2) nie dopuszcza się zawartości olejów mineralnych, jak również innych cieczy (kwasów, zasad) w postaci kropeł;

3) dopuszczalne zawartości w temperaturze 20°C przy ciśnieniu atmosferycznym 760 mm Hg olejów mineralnych i innych cieczy smarnych w postaci par w powietrzu jako gazie roboczym wynoszą do 1,5 lub 3 mg/m³ w temperaturze pracy od -30 do +50°C i do 1 lub 2 mg/m³ w temperaturze pracy od -50 do +50°C;

4) dopuszcza się zawartości śladowe (bez podawania ilości) par niektórych kwasów i zasad;

5) zawartość wagowa zanieczyszczeń stałych nie może przekraczać 0,1 mg/m³ powietrza określona w warunkach 20°C przy ciśnieniu atmosferycznym 760 mm Hg;

6) nie dopuszcza się, aby w powietrzu wchodzącym do urządzenia znajdowały się cząstki stałe, których największy wymiar liniowy przekracza 0,5 lub 5 mikrometrów.

1.3.2. Istota i rodzaje zanieczyszczeń

Jak już wspomniano, zanieczyszczenia płynów roboczych są to obce wtrącenia znajdujące się w układzie i zakłócające działanie każdej jego części. Mogą to być ciała stałe, które mają tendencje do zatykania otworów, ścierania i rysowania powierzchni oraz zakłócenia przepływu, jak też rozpuszczone czy zmieszane z materiałem, zmieniające parametry płynu, takie jak lepkość czy smarność, powodujące korozję powierzchni metalowych, psucie się uszczelnień itp.

Na rys. 1.8 podano zbiorcze zestawienie mikroobiektyw, które stanowią zanieczyszczenia bezpośrednie lub pośrednie oraz typowe parametry równoważne pod względem wymiarowym (sita, fale elektromagnetyczne), a ponadto przykład klasyfikacji filtrów przeznaczonych do usuwania zanieczyszczeń z podziałem ich z punktu widzenia zastosowań w płynowych urządzeniach pneumatycznych i hydraulicznych.

Zanieczyszczeniami bezpośrednimi mogą być wszystkie cząstki rozproszone w monolitycznej fazie płynnej i będące niepożądanymi wtrąceniami. W fazie ciekłej mogą być rozproszone cząstki stałe, ciekłe lub gazowe, w fazie gazowej cząstki stałe i ciekłe.

Zanieczyszczenia pośrednie powstają w wyniku procesów produkcyjnych. Mogą nimi być mikroziarna lub mikronierówności, które w wyniku zużywania się części, w skład których wchodzi, ulegają rozproszeniu w fazie podstawowej. Zanieczyszczeniami pośrednimi mogą być też mikroobiekty biologiczne, jak np. bakterie w wyniku fermentacji.

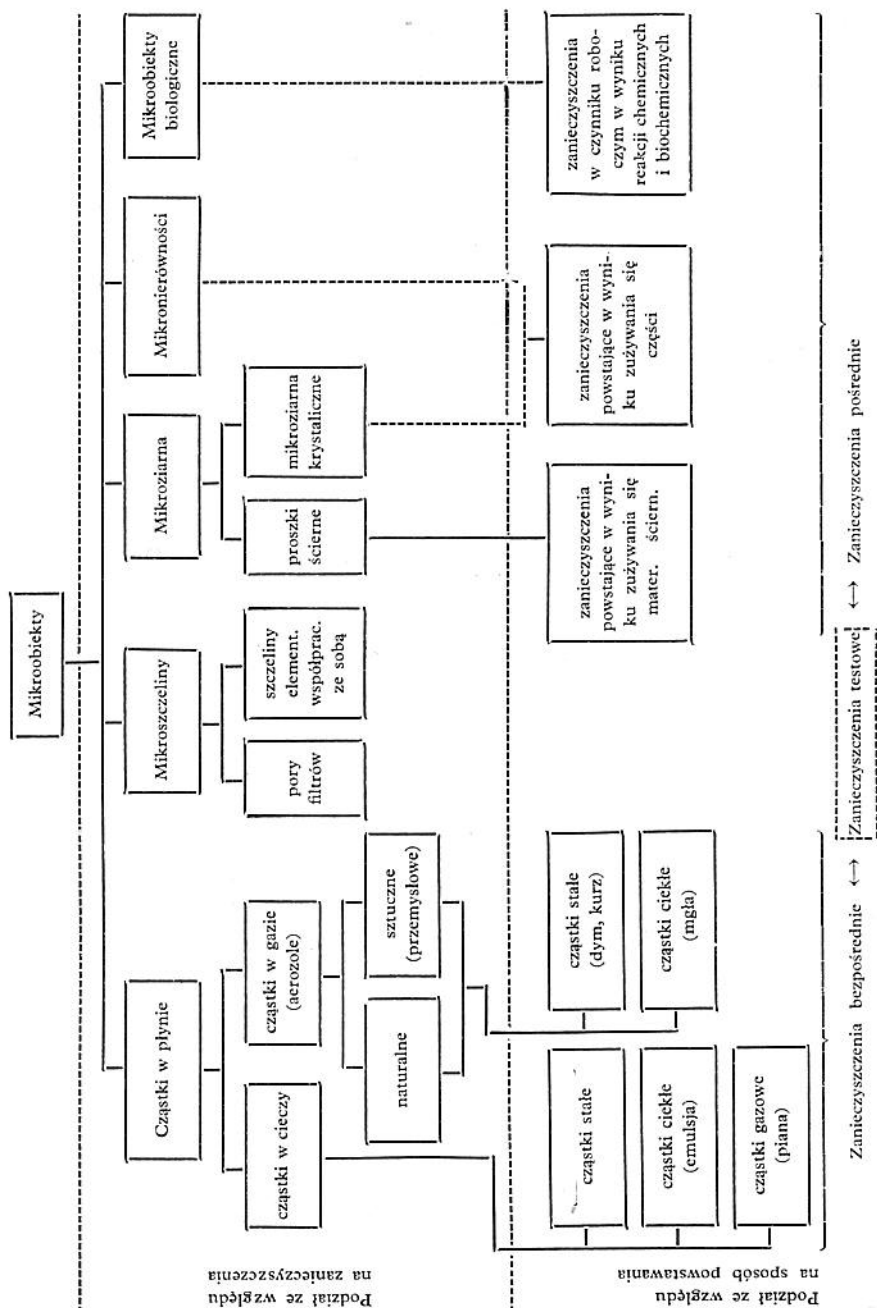
Na rys. 1.9 pokazano schemat sposobu tworzenia się zanieczyszczeń bezpośrednich i pośrednich w płynie roboczym. Wyróżniono tutaj klasę zanieczyszczeń testowych, o których wspomniano dalej.

Najbardziej istotnymi dla pracy urządzeń płynowych są zanieczyszczenia stałe. Można je scharakteryzować wymiarami (lub wymiarem zastępczym, najczęściej średnicą albo promieniem zastępczym), koncentracją (ciężarem) oraz składem chemicznym i twardością. Ponadto istotnym czynnikiem z punktu widzenia filtrowania jest stopień skoagulowania cząstek, ich własności elektryczne i magnetyczne oraz ciężar właściwy.

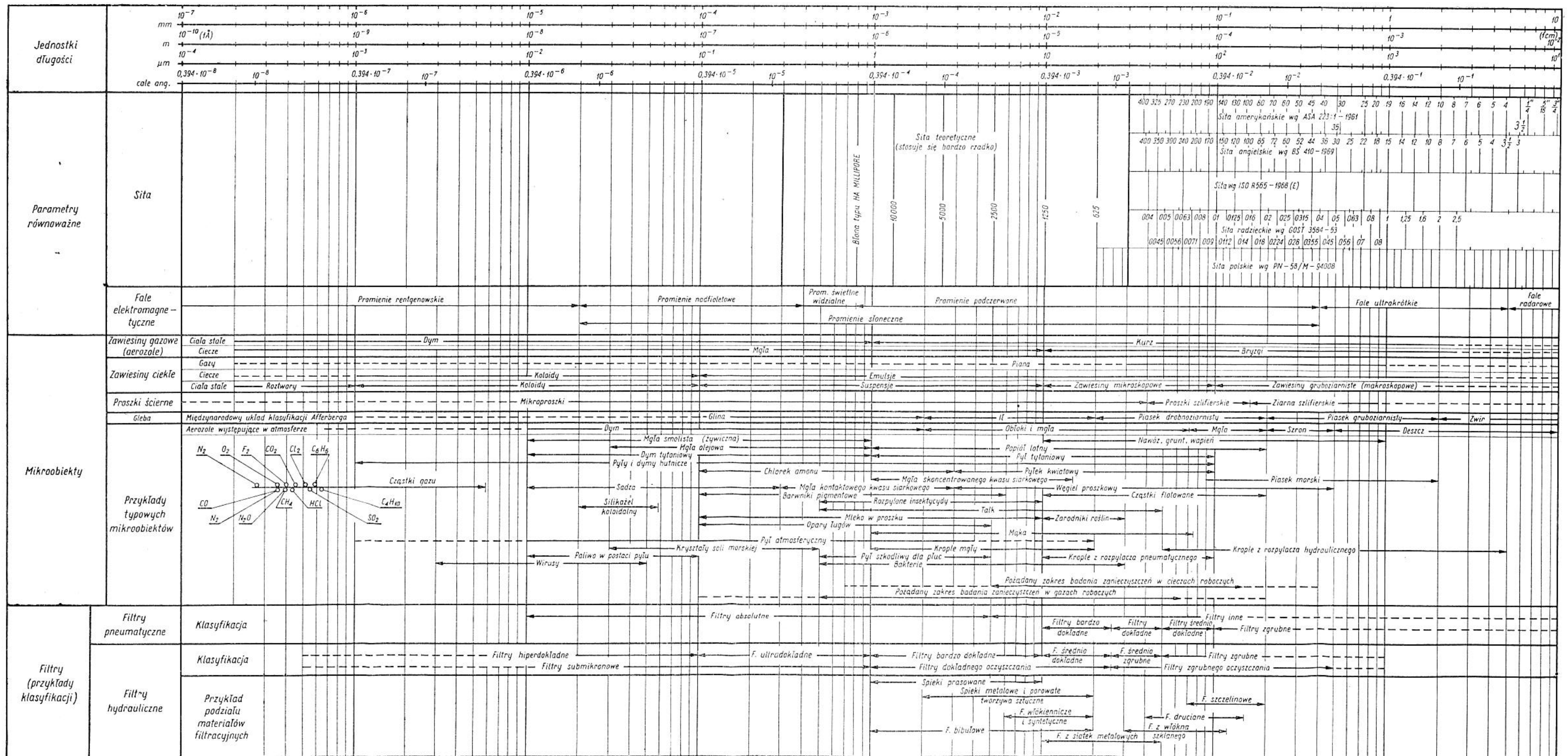
Zagadnienie oceny zanieczyszczeń plastycznych, które można uważać za elementy dyspersyjne płynu reologicznego, jest uwarunkowane wpływem takich zanieczyszczeń na własności przepływowe i fizyko-chemiczne płynu roboczego. Najbardziej celowe wydaje się określenie ich za pomocą koncentracji objętościowej i średniego stopnia dyspersyjności. Przy narzuceniu pewnych warunków ograniczających objętość zanieczyszczeń plastycznych, ich wpływ na pracę urządzeń, szczególnie hydraulicznych, może być pomijalny.

Ze względu na wymiary zanieczyszczenia można podzielić na *koloidalne*, *bardzo drobne* (0,1 do 2 μm), *drobne* (1 do 15 μm), *średnie* (od 10 do 40 μm) i *duże* (o średnicy przekraczającej 30 μm).

Ze względu na formę oddziaływania zanieczyszczenia szkodliwie wpływające na pracę urządzeń płynowych są scharakteryzowane głównie mechaniczną formą oddziaływania. W wielu przypadkach przyczyną niesprawności urządzeń płynowych są zanieczyszczenia, które oprócz mechanicznej formy oddziaływania wpły-



Rys. 1.9. Schemat podziału mikroobektów (z wyróżnieniem zanieczyszczeń) ze względu na sposób ich powstawania



Rys. 1.8. Zestawienie parametrów równoważnych, mikroobiektów oraz przykłady klasyfikacji filtrów

Tablica 1.17. Twardość pierwiastków i związków chemicznych stanowiących zanieczyszczenia płynów roboczych

Pierwiastek	Twardość wg skali Moosa	Pierwiastek	Twardość wg skali Moosa	Związek chemiczny	Twardość wg skali Moosa
Na	0,4-0,5	Cr	4,5-9,0	TiB ₁₂	9
K	0,5-0,4	Mo	5,5-8,0	ZrB ₂	7-8
Pb	0,3-1,5	W	4,0-8,0	VB ₂	8-9
Cs	0,2	Mn	5,0-6,0	CrB	8,5
Be	5,5	Co	5,0	CrB ₂	9
Mg	2,0-2,5	Ni	4,0	Mo ₃ B	8-9
Ca	1,7-2,5	Fe	4,0-4,5	WB ₂	9
Ti	6,0	Cu	3,0	Mn ₃ B ₄	8
Zr	5,0-6,7	Zn	2,5	TiC	8-9
H	5,5	Cd	2,0	Cr ₂ Si	9
V	7,0	Hg	1,5	ZrC	8-9
Nb	6,0-6,7	B	9,5-9,3	SiO ₂	6-7
T	6,5	Al	2,75	BeO	9
Sn	1,5	Ga	1,5-3,0	MgO	5-6
Sb	3,0	In	1,2	CaO	4,5
Bi	1,9-2,3	C(diament)	10	ZrO ₂	6,5-7
S	2,0	C(grafit)	0,5	MnO	5-6
Se	2,0	Si	6,5-7,0	NiO	5,5
Te	2,0-2,3	Ge	6,0-6,3	ZnO	4-5
Th	3,0			Al ₂ O ₃	9

wają również chemicznie, radioaktywnie, cieplnie, elektrycznie lub biologicznie.

Ze względu na kształty zanieczyszczeń mechanicznych (głównie stałych) wyróżniamy grupę kształtów podstawowych (o kształtach zbliżonych do kulistego i elipsoidalnego, o krawędziach ostrych i zaokrąglonych oraz o kształtach wydłużonych, włosowych, taletzowych, gąbczastych, nieregularnych itd.).

Zanieczyszczenia o kształtach nieregularnych, gąbczastych oraz z ostrymi krawędziami są bardzo niebezpieczne ze względu na możliwość rozdrabniania i tworzenia się dużej ilości zanieczyszczeń o mniejszych i nieregularnych kształtach, co w konsekwencji ułatwia wnikiwanie ich do szczelin oraz do osadzania się na nierównościach powierzchni wewnętrznych elementów.

Jednym z ważnych, a w wielu przypadkach najważniejszym parametrem określającym skutek oddziaływania jest *twardość zanieczyszczeń stałych*; określa ona w dużej mierze charakter zużycia lub uszkodzenia współpracujących ze sobą elementów. W dostępnej literaturze spotyka się stosunkowo mało informacji na temat twardości zanieczyszczeń występujących w płynach roboczych. Nie ma także kompletnego zestawienia twardości zanieczyszczeń, które powstają podczas pracy urządzenia w wyniku używania się elementów konstrukcyjnych i oddziaływań chemicznych. W tabl. 1.17 podano zakresy twardości podstawowych pierwiastków chemicznych, których znaczne ilości lub ślady można spotkać w cieczach i gazach roboczych urządzeń płynowych pracujących w różnych warunkach.

Twardość zanieczyszczeń zmienia się z temperaturą oraz zależy od technologii wykonania części składowych urządzenia, z którego wytworzyła się cząstka zanieczyszczenia. Dla przykładu można porównać twardość chromu: dla Cr polikrystalicznego wynosi ona 70 HB, dla elektrolitycznego przetopionego 114 HB, odlewnego od 70 do 236 HB, elektrolitycznego od 600 do 650 HB, po obróbce cieplnej od 70 do 150 HB.

Najgroźniejsze ze względu na bardzo dużą twardość są połączenia różnych pierwiastków. W tabl. 1.17 podano również przykłady takich związków.

1.3.3. Przyczyny i skutki obecności zanieczyszczeń w cieczach roboczych

Źródłami zanieczyszczeń są: same ciecz robocze, pozostałości po niedokładnym oczyszczeniu elementów składowych urządzeń hydraulicznych, części współpracujące układu hydraulicznego oraz otoczenie.

Do źródeł zanieczyszczeń spowodowanych przez ciecz roboczą można zaliczyć:

- niedostateczne smarowanie ruchomych części mechanicznych współpracujących ze sobą w całym zakresie obciążenia i temperatur roboczych,

- oddziaływanie chemiczne i mechaniczne na części niemetalowe, a szczególnie na uszczelnienia gumowe,

- korozję metali i stopów konstrukcyjnych (żelazo, stal, miedź, brąz, aluminium i inne) stosowanych w układach hydraulicznych,

- zmianę stabilności cieplnej i chemicznej cieczy,

- zatrzymywanie wody w cieczy,

- wprowadzenie zanieczyszczeń do obiegu zawartych w cieczy, podczas napełniania i zawartych w przestrzeniach i na powierzchni wewnętrznej urządzeń hydraulicznych,

- niezwilżanie metalu przez ciecz roboczą i nieutrzymywanie warstwy ochronnej.

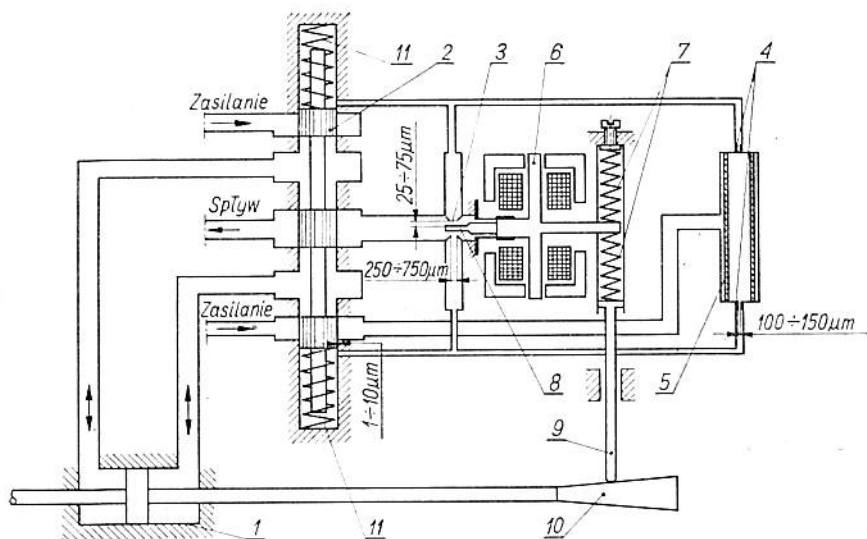
Ciecz robocza jest nośnikiem zanieczyszczeń nie tylko uprzednio w płynie zawartych, ale też zanieczyszczeń pochodzących od współpracujących z płynem ciał. Dlatego bardzo ważne jest określenie granic zanieczyszczeń w płynach roboczych przed i w czasie eksploatacji. Analiza zanieczyszczeń w cieczy po eksploatacji umożliwia uzyskanie obrazu zanieczyszczeń w całym układzie. Normy najczęściej klasyfikują ciecze robocze w zależności od zawartości wtrąceń stałych w podanych zakresach w próbce o objętości 100 ml (patrz punkt 1.3.1).

Na obecność zanieczyszczeń w elementach układu hydraulicznego wpływ ma przede wszystkim wytwarzanie tego elementu. Takie rodzaje obróbki, jak spawanie, skrawanie wytwarzają znaczne ilości zanieczyszczeń, zwłaszcza jeśli są dokonywane na produkcie końcowym. Źródłem zanieczyszczeń często są też operacje montażowe. Części składowe powinny być tak skonstruowane, aby zminimalizować szkodliwe skutki zanieczyszczeń i wytwarzanie zanieczyszczeń podczas działania urządzenia.

Zanieczyszczenia powstają wskutek zużywania się mechanicznego (ścieranie się współpracujących ze sobą części), jak też oddziaływania chemicznego (korozja). Często zanieczyszczenia dostają się wskutek oczyszczania układu w niedostatecznie czystym otoczeniu i niedostatecznie czystymi środkami. Ważne jest, aby pomieszczenie było wolne od kurzu i innych zanieczyszczeń, jak też należy używać możliwie czystego oleju do płukania.

Na rys. 1.10 przedstawiono schemat działania typowego układu hydraulicznego. Ciecz pod ciśnieniem przechodzi przez filtr 5 o nominalnej dokładności oczyszczania 10 μm i jest rozdzielona na dwa strumienie, z których każdy przechodzi przez stały opór 4

hydrauliczny i stąd jest kierowany do jednej z dwóch dysz 3. Zwora silnika momentowego 6 uruchamiając urządzenie powoduje przesunięcie przysłony 8 np. w kierunku ruchu wskazówek zegara. Powoduje to wzrost ciśnienia w dyszy górnej. Na tłok rozdzielacza



Rys. 1.10. Serwomechanizm hydrauliczny z mechanicznym sprzężeniem zwrotnym i występujące typowe tolerancje oraz wymiary oporów dławiających; 1 — siłownik, 2 — suwak rozdzielczy, 3 — dysze sterujące, 4 — opory dławiające wejściowe, 5 — filtr wewnętrzny wzmacniacza hydraulicznego, 6 — zwora silnika momentowego, 7 — sprężyny, 8 — przysłona, 9 — popychacz, 10 — krzywka, 11 — sprężyny zwrotne suwaka

w komorach 11 jest wywierana siła hydrauliczna przesuwająca suwak 2, w dół. Ruch ten powoduje otwarcie dopływu, tak że ciśnienie jest podawane na prawą stronę siłownika 1, przesuwając go w lewo. Krzywka 10 przesuwając się powoduje ruch popychacza 9 w górę. Popychacz oddziałuje na przysłonę 8 obracając ją w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara, co powoduje uzyskanie przez suwak rozdzielczy i tłok siłownika położenia neutralnego.

W układzie tym luz między dyszą a przysłoną jest rzędu $25 \mu\text{m}$. Cząstki umiejscowione między przysłoną zwrora a dyszą uniemożliwiłyby przysłonie uzyskanie neutralnego położenia, a zatem tłok byłby prowadzony tylko do jednego końca. Z tego względu na dopływie do dysz umieszczono filtr o dokładności oczyszczania $10 \mu\text{m}$.

Obecność zanieczyszczeń stałych w szczelinach rozrzędu powoduje wzrost tarcia statycznego i sił hydraulicznych, które dążą do usunięcia obcych cząstek. Duże siły hydrauliczne powodują nierówną pracę wzmacniacza i mogą doprowadzić do jego uszkodzenia (zarówno części metalowych jak i uszczelnień).

W firmie Martin Co przeprowadzono badania nad efektem zanieczyszczeń i ich wpływem na działanie hydraulicznego układu wykonawczego. Badaniu poddano 83 serwomechanizmy. Po ich rozmontowaniu 33 serwomechanizmy poddano procesowi czyszczenia, który polegał jedynie na przepłukaniu kadłuba serwowozworu. W pozostałych 50 oprócz przepłukania, kadłub serwowozworu poddano drganiom. Po tych zabiegach znaleziono opiłki metalowe w jednym serwomechanizmie, który był jedynie płukany i w trzech, które poddawane były drganiom podczas płukania. Rozcięte pierścienie uszczelniające znaleziono w 13 serwomechanizmach, które poddawane były płukaniu i w 11, które poddane były płukaniu i drganiom. Chociaż 14 serwomechanizmów wybranych z 33 (jedynie płukanych) zawierało opiłki metalowe lub skrawki pierścieni uszczelniających i istniała potencjalna możliwość wadliwego działania, tak samo jak w serwomechanizmach poddanych płukaniu i drganiom, to jednak jak wykazano — prawdopodobieństwo wadliwego działania w grupie jedynie płukanej wynosiło 42%, a w grupie poddawanej drganiom podczas płukania — 28%. W tabl. 1.18 przedstawiono selekcję serwowozworów w zależności od rodzaju oczyszczenia.

Badanie zanieczyszczeń układu hydraulicznego silnika odrzutowego General Electric YJ93-GE-3 doprowadziło do stwierdzenia, że w ciągu pierwszych 10 godzin działania silnika układ hydrauliczny ma bardzo wysoki poziom zanieczyszczeń (około 10 kla-

Tablica 1.18. Selekcja serwowozworów w zależności od rodzaju oczyszczenia

	Jedynie płukane	Poddane drganiom i płukane	Poddane drganiom, czyszczone specjalną szczotką drucianą oraz płukane
Liczba badanych zaworów	606	460	232
Liczba odrzuco- nych zaworów	509	414	140
Ilość odrzuconych zaworów w %	84	90	60

sy wg N.A.S.1638). Zanieczyszczenia te w postaci płatków mają wysoki procent zawartości węgla. Podejrzewano początkowo, że źródłem tych płatków węglowych jest utlenianie się cieczy układu hydraulicznego, spowodowane wysokimi temperaturami.

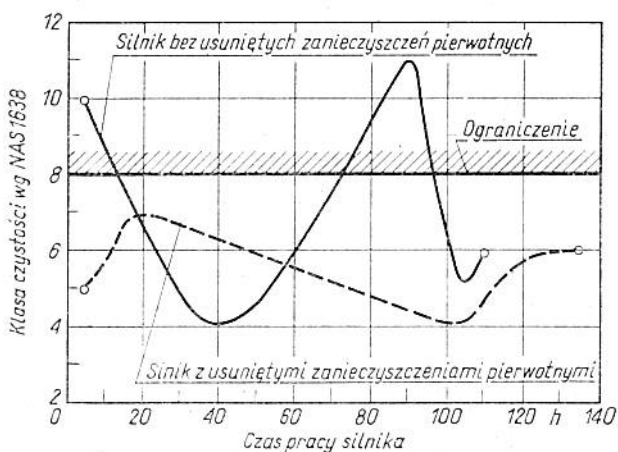
Następne badania wykazały, że podczas działania urządzenia duża ilość spalonej mieszanki była wewnątrz urządzenia w połączeniach spawanych rur. Wewnętrzne powierzchnie rur były zwilżane cieczą układu podczas badania i napełniania podzespołu. Utlenianie się cieczy było spowodowane lutowaniem w atmosferze nie-neutralizowanej.

Wysoki poziom liczby cząstek rejestrowany podczas pierwszych godzin pracy był dowodem, że wewnątrz silnika znajdowały się już zanieczyszczenia w nadmiernej ilości i krążyły w układzie aż układ filtrów nie sprowadził poziomu zanieczyszczeń do równowagi.

W celu eliminacji szkodliwych zanieczyszczeń zastosowano następujące czynności:

- 1) ograniczenie zanieczyszczeń umiejscowionych na każdej części dostarczonej przez indywidualnego sprzedawcę;
- 2) czyszczenie podzespołów od 6 klasy poziomu zanieczyszczeń;
- 3) dodanie pomocniczego filtra absolutnego $3 \mu\text{m}$ do układu podczas początkowych godzin pracy.

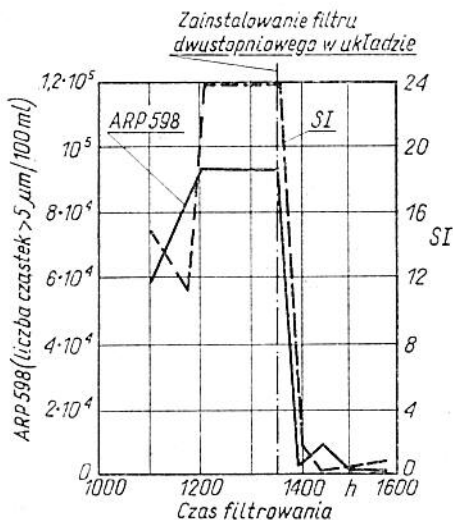
Wyniki powyższych zabiegów przedstawiono na wykresach na rys. 1.11. Wykres pokazuje poziomy zanieczyszczeń układu hydraulicznego, osiągnięte przez dwa silniki o identycznych charakterystykach i wytrzymałości, przy czym do jednego zastosowano zabiegi eliminujące zanieczyszczenia pierwotne — pomocniczy filtr,



Rys. 1.11. Wykres zmiany zawartości zanieczyszczeń w układzie silnika podczas jego pracy w zależności od czasu pracy

a w drugim ich nie zastosowano. Wysokie poziomy zanieczyszczeń obserwowano podczas pierwszych godzin działania; zostały one zmniejszone do poziomu zapewniającego dostateczne działanie. Poziom ten może być utrzymany. Zakres klas zanieczyszczeń obserwowano w silniku bez filtra pomocniczego; jest mniej korzystny i wynosi 7 klas, podczas gdy w silniku z filtrem pomocniczym wynosi 3 klasy.

Niezależnie od przyczyn powstawania zanieczyszczeń, najważniejszą rolę do spełnienia mają filtry. Zainstalowanie odpowiednich filtrów najczęściej prowadzi do pozbycia się trudności z nadmiernym wzrostem zawartości zanieczyszczeń w układzie. Na rys. 1.12 przedstawiono gwałtowne zmniejszenie zawartości za-



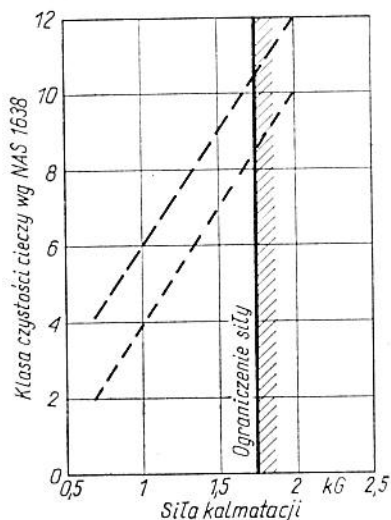
Rys. 1.12. Wykres zmiany zawartości zanieczyszczeń po zainstalowaniu w układzie filtra dwustopniowego nowego typu

nieczyszczeń w układzie hydraulicznym samolotu pasażerskiego Boeing Company po zainstalowaniu filtra dwustopniowego nowej konstrukcji, opracowanego przez firmę Aircraft Porous Media (USA). Ocenę koncentracji przeprowadzono metodami (ARP-598 oraz przy wykorzystaniu wskaźnika kolmatacji).

Oprócz ustalenia i ograniczenia oraz zniwelowania wpływu źródeł zanieczyszczeń ważne jest określenie ilości i wymiarów zanieczyszczeń dopuszczalnych dla danego układu, czyli granicy zanieczyszczeń układu.

Granice zanieczyszczeń układu określa się taką, aby funkcja wyjściowa była jak najmniej zakłócona. Przykład opisuje badania

przeprowadzone na najbardziej czułym na zanieczyszczenia elemencie układu hydraulicznego, a mianowicie rozdzielaczu o działaniu proporcjonalnym. Wyniki badań uwidocznił na wykresie pokazanym na rys. 1.13. Wykres przedstawia zależność klas zanieczyszczeń i siły kolmatacji spowodowanej zanieczyszczeniami. Poziom klasy 12 zanieczyszczeń powoduje siłę kolmatacji około



Rys. 1.13. Zależności między poziomem zanieczyszczeń a siłą kolmatacji

1,9 kG przesuwającą tłok rozrządu z położenia zerowego. Ciecz stanowiska hydraulicznego, po przefiltrowaniu do klasy 3 powoduje zredukowanie siły kolmatacji do 0,6 kG. Poziom siły kolmatacji względem poziomu zanieczyszczeń jest bazowany na dwóch poziomach zanieczyszczeń; na rys. 1.13 jest pokazany jako pasmo, ponieważ poziomy sił zostały zmierzone zależnie od oszacowanych zmian poziomu zanieczyszczeń istniejących w tym samym czasie. Siłę kolmatacji dla każdego nastawienia mierzono po 6 minutach. Siła ta wzrasta wraz ze wzrostem spadku ciśnienia w rozdzielaczu.

Wyniki pomiarów przedstawione na wykresie dotyczą ciśnienia zasilania rozdzielacza 4000 psi (280 kG/cm²) przy ciśnieniu splywu 80 psi (5,6 kG/cm²).

Rozdzielacz charakteryzują następujące wielkości:

- przeciek do splywu — 5 GPM (18,8 l/min),
- luz promieniowy — 0,0006" (0,0153 mm),
- średnica tłoczka — 0,375" (9,53 mm),
- twardość tłoczka i tulei ponad 70 HRC.

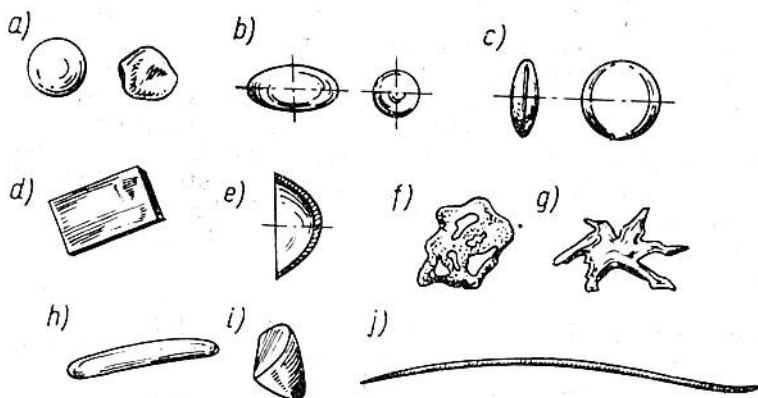
Badania wykazały, że siła kolmatacji w rozdzielaczu większa niż 1,59 kG powoduje utratę ciągłości działania tego elementu. Z wykresu wynika, że aby otrzymać siłę kolmatacji nie przekraczającą tej wartości poziom zanieczyszczeń układu musi być ograniczony do klasy 8 (wg N.A.S. 1638).

1.3.4. Kształty i wymiary cząstek zanieczyszczeń

W praktyce bardzo rzadko zdarzają się przypadki, w których cząstki zanieczyszczeń mają kształty na tyle regularne, aby można było w sposób łatwy opisać ich parametry geometryczne. Najczęściej dąży się do określenia jednego zastępczego wymiaru. Jest to przeważnie średnica kuli, bok sześcianu lub średnica walca o wysokości równej promieniowi. Sposób przyporządkowania zastępczego wymiaru cząstce rzeczywistej zależy głównie od sposobu dokonywania pomiaru, albo też od narzuconego kryterium wymiarowania w danej metodzie pomiarowej. Cząstki zanieczyszczeń płynów roboczych stanowią zróżnicowaną kategorię mikroobiektów zarówno pod względem kształtów geometrycznych, jak i pod względem własności fizyko-chemicznych.

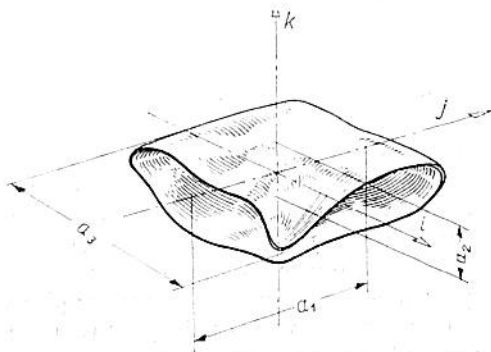
Zajmiemy się najpierw określeniem parametrów geometrycznych cząstek zanieczyszczeń. Najczęściej występującymi kształtami cząstek zanieczyszczeń są kształty przedstawione na rys. 1.14.

Spośród typowych kształtów cząstek zanieczyszczeń wyróżnia się w praktyce najczęściej dwie lub trzy podstawowe grupy: kuli-



Rys. 1.14. Typowe kształty charakterystyczne cząstek zanieczyszczeń płynów roboczych: a) kuliste i zaokrąglone, b) elipsoidalne, c) dyskowe, d) blaszkowe, e) łupinowe i talerzowe, f) gąbczaste (porowate), g) gwiaździste (nie-regularne), h) pałeczkowe, i) klinowe, j) włosowe

ste, płytkowe i włosowe (rys. 1.15). Kryterium takiego podziału opiera się na wzajemnych stosunkach trzech głównych wymiarów cząstki: długości (największy wymiar liniowy), grubości i szerokości (określających przekrój cząstki w płaszczyźnie prostopadłej do



Rys. 1.15. Kryterium klasyfikacji cząstek: a_1, a_2, a_3 — główne wymiary cząstki (długość, wysokość, szerokość) mierzone wzdłuż osi głównych cząstki i, j, k ; $a_1 \approx a_2 \approx a_3$ — cząstki kuliste, $a_1 \gg a_2, a_1 \gg a_3, a_2 \approx a_3$ — cząstki włosowe, $a_1 \gg a_2, a_3 \gg a_2$ — cząstki płytkowe

długości). Jeżeli wszystkie trzy wymiary są w przybliżeniu równe sobie, to cząstki takie niezależnie od stopnia podobieństwa do kształtu bryły regularnej zalicza się do cząstek o kształcie kulistym. Jeżeli wymiary określające przekrój cząstki są zbliżone do siebie, ale dużo mniejsze od długości, to takie cząstki są zaliczone do grupy cząstek o kształcie włosowym. Jeżeli jeden z wymiarów głównych określający cząstkę jest dużo mniejszy od dwu pozostałych, to cząstki takie są zaliczane do grupy cząstek płytkowych.

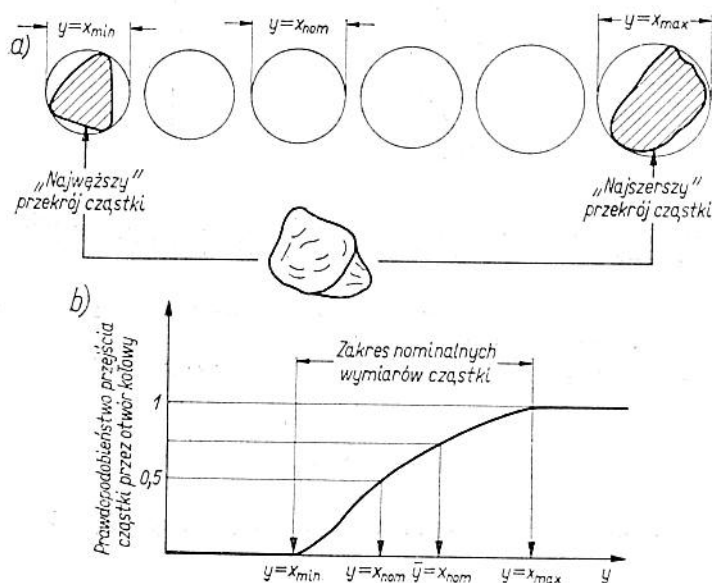
Wyróżnienie grup kształtów cząstek prowadzi jednak zawsze do konieczności określenia przynajmniej jednego wymiaru charakteryzującego wielkość cząstki. Ze względu na znaczne rozbieżności w definiowaniu wymiarów zastępczych cząstek, autor wprowadził podstawową definicję średnicy nominalnej cząstki niezależną od sposobu pomiaru i kształtu cząstki. Definiowanie takie jest szczególnie przydatne w opisie procesu filtrowania płynów roboczych.

Średnicą nominalną cząstki rzeczywistej o kształcie nieregularnym nazywać będziemy średnicę odpowiadającą równym sobie prawdopodobieństwom mechanicznego zatrzymania lub przejścia cząstki przez otwór kołowy o średnicy $y = x_{nom}$.

Umowną średnicą nominalną cząstki o kształcie nieregularnym nazywać będziemy średnicę odpowiadającą umownym wartościom prawdopodobieństw mechanicznego zatrzymania i przejścia cząstki przez otwór kołowy o średnicy $y = \bar{x}_{nom}$.

Zakresem nominalnych wymiarów cząstki o kształcie nieregularnym x_{min} — x_{max} nazywać będziemy najmniejszy zakres średnic odpowiadający wartości 0 i 1 prawdopodobieństwa zatrzymania lub przejścia cząstki przez otwory kołowe w średnicy $y = x_{min}$ i $y = x_{max}$. Zakres wymiarowy cząstki o najprostszym przypadku odpowiada geometrycznie wartościom mieszczącym się między średnicami koła opisanego w „najwęższym” i „najszerszym” przekroju rzutu cząstki (rys. 1.16).

W praktyce korzysta się z wielu definicji średnic zastępczych i umownych cząstki. Wyróżnia się zastępcze wymiary geometryczne związane z powierzchnią i objętością cząstki, umowne wymiary geometryczne związane z oceną rzutu cząstki na płaszczyznę (tzw. wymiary projekcyjne) oraz wymiary określone na podstawie cech fizyko-chemicznych cząstek (cechy plynodynamiczne, radiacyjne, cieplne, elektryczne, itp.).



Rys. 1.16. Sposób określania średnicy nominalnej cząstki: a) interpretacja geometryczna, b) interpretacja probabilistyczna

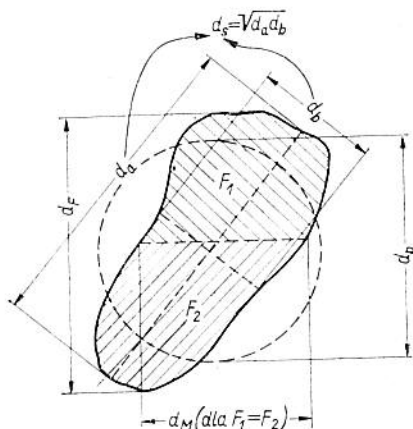
Na pokreślenie zasługują cztery wymiary projekcyjne, określające średnie statystyczne średnice cząstek (rys. 1.17):

— średnica *G. Martina* d_M — długość linii dzieląca na dwie równe części rzut cząstki; długość ta jest określana w danym zbiorze cząstek zawsze w tym samym kierunku;

— średnica V. D. Frechette'a d_F — odległość między dwiema równoległymi liniami st stycznymi do zarysu rzutu cząstki;

— średnica średnia cząstki d_s — wymiar określony przez średnią arytmetyczną lub geometryczną dwu wymiarów liniowych w kierunku prostopadłych do siebie,

— średnica powierzchniowa cząstki d_p — średnica określająca powierzchnię koła równego powierzchni rzutu cząstki.



Rys. 1.17. Graficzne przedstawienie średnich statystycznych średnic cząstki określanych wg różnych kryteriów na podstawie wymiarów rzutu cząstki

Dla zbioru cząstek n_i o różnych wymiarach wprowadza się różnie określone średnice zastępcze:

— średnia średnica arytmetyczna wg liczby cząstek n_i

$$d_1 = \frac{\sum_i n_i x_i}{\sum_i n_i} \quad (1.1)$$

— średnia średnica logarytmiczna wg liczby cząstek

$$\lg d_2 = \frac{\sum_i n_i \lg x_i}{\sum_i n_i} \quad (1.2)$$

— średnia średnica powierzchniowa wg liczby cząstek

$$d_3 = \left[\frac{\sum_i n_i x_i^2}{\sum_i n_i} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.3)$$

— średnia średnica powierzchniowa wg wymiaru liniowego równoważna całkowitej powierzchni cząstek podzielonej przez sumę ich średnic.

$$d_4 = \frac{\sum_i n_i x_i^2}{\sum_i n_i x_i} \quad (1.4)$$

— średnia średnica objętościowa wg liczby cząstek

$$d_5 = \left[\frac{\sum_i n_i x_i^3}{\sum_i n_i} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (1.5)$$

— średnia średnica objętościowa wg powierzchni cząstek

$$d_6 = \frac{\sum_i n_i x_i^3}{\sum_i n_i x_i^2} = \frac{d_5^3}{d_3^2} \quad (1.6)$$

— średnia średnica wg masy (wykorzystywana często w praktyce, a nie mająca sensu fizycznego)

$$d_7 = \left[\frac{\sum_i n_i x_i^4}{\sum_i n_i} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (1.7)$$

— średnia średnica harmoniczna równa powierzchni względnej wszystkich cząstek

$$d_8 = \frac{\sum_i n_i}{\sum_i \frac{n_i}{x_i}} \quad (1.8)$$

oraz inne średnice zastępcze definiowane rozmaicie.

W dokładnych badaniach procesów filtrowania płynów jest wymagana ilościowa znajomość wymiarów cząstek zanieczyszczeń. W tym przypadku nie jest wystarczająca znajomość wymiarów cząstek, ale przede wszystkim ich rozkład wymiarowy, np. rozkład liczby cząstek w funkcji średnic nominalnych.

Wynika to z faktu, że zanieczyszczone płyny robocze stanowią układ zawierający cząstki zanieczyszczeń, których średnice są zawarte w szerokim zakresie wymiarowym. O ile dla scharakteryzowania np. układów koloidalnych wystarcza często określenie średniej średnicy cząstek lub jej odwrotności (stopnia dyspersji), o tyle w badaniach zanieczyszczeń płynów roboczych a szczególnie cieczy, niezbędne staje się określenie zakresów wymiarowych, wyszczególniających ilość cząstek oraz udziały ilościowe w tych zakresach; dalej posuniętą oceną rozkładu cząstek w płynach są ich opisy analityczne dokonywane przy wykorzystaniu znormalizowanych funkcji ciągłych gęstości rozkładu prawdopodobieństw występowania cząstek w płynie. Wreszcie najdoskonalszym opisem wielkości charakteryzujących rozkład cząstek w płynie jest przedstawienie analityczne rozkładu w postaci funkcji gęstości, w której zmienną określającą wymiar cząstki jest wartość najbardziej prawdopodobna skutku „działania” tego wymiaru w danym zastosowaniu, a więc dla uzmiennionej średnicy poszczególnej cząstki.

Rozkład wymiarowy cząstek jest tutaj szczególnym przypadkiem rozkładu określonego doświadczalnie, w którym ocenia się, na podstawie określonego kryterium, zastępcze (stałe) średnice cząstek. Konieczność „uzmienniania” średnic cząstek jest spowodowana niemożliwością ścisłego opisu, przy użyciu jednego tylko wymiaru liniowego, pełnych cech geometrycznych cząstki.

Poniżej przedstawiono interesujące w praktyce wielkości charakteryzujące cząstki zanieczyszczeń płynów wg podziału na frakcje wymiarowe. Przyjmując, że w przedziale wymiarowym Δx_j wartość x_j jest średnicą reprezentującą wymiar cząstek frakcji, a N jest sumą wszystkich cząstek z poszczególnych przedziałów

$$N = \sum_j n_j \quad (1.9)$$

zaś udział ilościowy

$$A_j = \frac{n_j}{N} \quad (1.10)$$

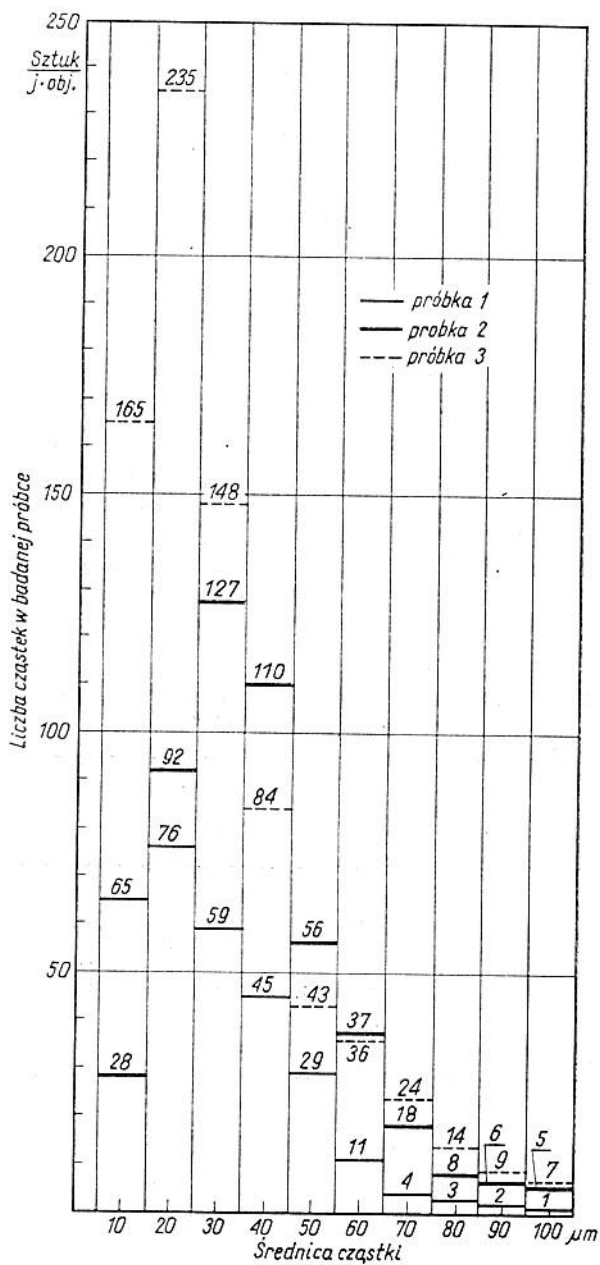
otrzymamy następujące zależności

— udział objętościowy j frakcji wymiarowej

$$B_{jv} = A_j \left(\frac{x_j}{d_s} \right)^3 \quad (1.11)$$

— udział powierzchniowy j frakcji wymiarowej

$$B_{js} = A_j \left(\frac{x_j}{d_s} \right)^2 \quad (1.12)$$



Rys. 1.18. Wyniki badań trzech próbek powietrza

— udział liczby cząstek i frakcji wymiarowej

$$B_{jn} = A_j \left(\frac{x_j}{d_1} \right) \quad (1.13)$$

Często w praktycznych obliczeniach jest wykorzystywana wielkość $\bar{F} \frac{\text{cm}^2}{\text{g}}$ zwana *powierzchnią właściwą frakcji* wymiarowej cząstek zanieczyszczeń

$$\bar{F} = \frac{8d_3^2 \sum n_j}{d_5^3 \sum n_i \gamma_i} \quad (1.14)$$

— gdzie γ_i — masa właściwa cząstki zanieczyszczenia.

Przykład. Dokonano pomiaru zanieczyszczeń w trzech próbkach powietrza pobranego z kopalni węgla. Przeprowadzono analizę składu wymiarowego cząstek zanieczyszczeń w zakresie wymiarów od 10 do 100 μm . Zakres wymiarów podzielono na 10 różnych frakcji. Rozkład liczby cząstek w poszczególnych próbkach z podziałem na frakcje przedstawiono na rys. 1.18, zestawienie niektórych średnic zastępczych — w tabl. 1.19 oraz dla II prób-

Tablica 1.19. Wyniki obliczeń średnic zastępczych oraz powierzchni właściwej

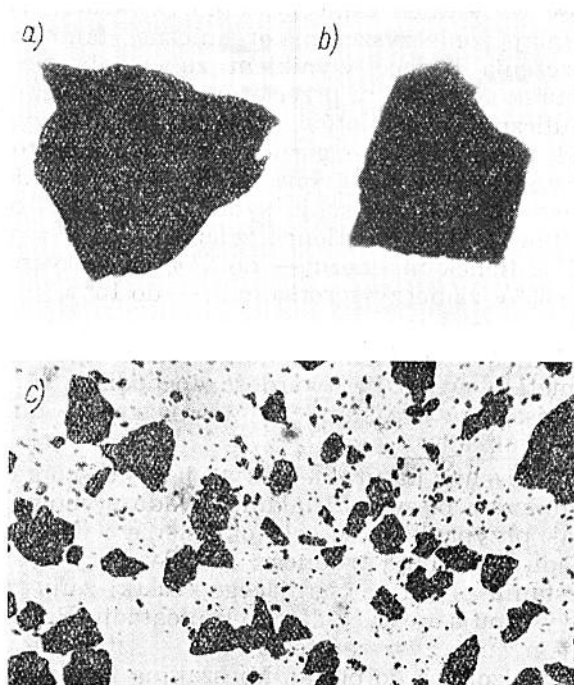
	Próbka gazu		
	I	II	III
$\sum n_i$	295	487	765
$d_1 \mu\text{m}$	59	75	60
$d_3 \mu\text{m}$	68	83	71
$d_5 \mu\text{m}$	77	91	82
$d_6 \mu\text{m}$	97	109	111
$F \frac{\text{m}^2}{\text{kg}}$	62,5	56,6	56,4

ki wielkości charakteryzujące frakcje wymiarowe zanieczyszczeń — w tabl. 1.20.

Pomiary dokonano na podstawie zdjęć mikroskopowych próbek. Przykładowe fotografie są pokazane na rys. 1.19, na którym wyodrębniono dwie cząstki w celu zwrócenia uwagi na rzeczywiste kształty rzutu cząstek zanieczyszczeń.

Tablica 1.20. Wielkości charakteryzujące frakcje wymiarowe zanieczyszczeń w próbce II powietrza

$x_j \pm 5$ μm	n_j	A_j	B_{jv}	B_{js}	B_{jn}
10	28	0,057	0,031	0,003	0,015
20	92	0,189	0,016	0,044	0,101
30	127	0,261	0,075	0,136	0,208
40	110	0,226	0,153	0,209	0,241
50	56	0,115	0,153	0,166	0,153
60	37	0,076	0,174	0,158	0,121
70	18	0,087	0,135	0,105	0,069
80	8	0,016	0,089	0,061	0,035
90	6	0,012	0,095	0,058	0,030
100	5	0,010	0,109	0,059	0,029
Σn_j 487					



Rys. 1.19. Mikrofotografia cząstek zanieczyszczeń: a, b) cząstek wyodrębnionych, c) próbki płynu zanieczyszczonego (po zagęszczeniu)

1.3.5. Zanieczyszczenia naturalne i testowe

Zanieczyszczenia naturalne w układzie płynowym powstają w wyniku przenikania cząstek pierwiastków i związków z naturalnego otoczenia. Wpływ na skład chemiczny takich zanieczyszczeń ma ogólnie działalność ludzka oraz zawartość pierwiastków na powierzchni ziemi (atmosfera, hydrosfera i litosfera). Szacuje się, że rozpowszechnienie pierwiastków układu się wg następujących zawartości: tlen — 49,85%, krzem — 25,3%, glin — 7,5%, żelazo — 5,08%, wapń — 3,39%, sód i potas po ok. 2,5%, magnez — 1,95%. Zawartość wodoru, tytanu, chloru, fosforu, manganu, węgla, siarki kształtuje się w zakresie od 0,87 do 0,06%, a wszystkich pozostałych pierwiastków na ok. 0,2%. Tylko niektóre z pierwiastków występują w stanie wolnym. Większość stanowią substancje złożone (związki chemiczne składające się z 3 do 6 pierwiastków).

Urządzenia płynowe pracujące w wyjątkowo trudnych warunkach naturalnych (maszyny budowlane, górnicze, odlewnicze) zawierają do 70% zanieczyszczeń, których źródłem jest otoczenie. Ponadto ilość wszystkich zanieczyszczeń zawartych w cieczy roboczej dopełniają zanieczyszczenia organiczne, stanowiące ok. 20%, a zanieczyszczenia będące wynikiem zużywania się elementów układu ok. 10%. Na ogół, w przeciętnych warunkach pracy urządzeń hydraulicznych samolotów, pojazdów drogowych, maszyn budowlanych, itp. graniczne górne wartości procentowej zawartości zanieczyszczeń wynoszą: piasek kwarcowy — do 75%, minerały łupliwe (kalcyt, smitsonit, syderyt i inne) — do 25%, tlenek aluminium — do 20%, tlenek żelaza — do 5%, tlenek wapnia — do 4%, tlenek magnezu — do 2%, zanieczyszczenia organiczne — do 30%, zanieczyszczenia inne — do 15%.

Twardość kwarcu i szpatów jest wysoka i wynosi od 5 do 7 stopni wg skali Moosa. Tlenki metali i różne inne związki metali oraz cermetale wykazują twardość dochodzącą do 9,5 stopnia wg skali Moosa. One też stanowią główną groźbę unieruchomienia elementów układu.

Zanieczyszczenia naturalne mają, jak już poprzednio omówiono, zasadniczy wpływ na działanie układu płynowego. W większości jednak przypadków, w celu określenia i doboru filtrów do danego układu występują trudności w laboratoryjnych badaniach w wykorzystaniu płynu zawierającego cząstki zanieczyszczeń takie, jakie występują w warunkach eksploatacji. Przemawia to za zastosowaniem zanieczyszczeń testowych — sztucznie przygotowanych i wprowadzonych do płynu. Mieszanina taka następnie była użyta do badań filtrów oraz badań jej wpływu na działanie elementów i całego układu.

Dwa przeciwstawne względy warunkują wybór zanieczyszczeń testowych do badań filtrów płynów roboczych. Pierwszy wzgląd wskazuje na wybór zanieczyszczeń testowych o składzie i wymiarach zbliżonych do naturalnych, prowadzi to jednak do dużych błędów w ocenie badanych filtrów ze względu na poważne trudności w prawidłowym określeniu wymiarów zanieczyszczeń. Drugi wzgląd wskazuje na wybór cząstek zanieczyszczeń testowych o kształtach regularnych, prowadzi to jednak do skażenia wyników badań, ale zapewnia ich większą jednoznaczność oraz powtarzalność, co w przypadku badań porównawczych ma wyjątkowo duże znaczenie. Trzecim, mniej istotnym powodem ograniczającym zastosowanie zanieczyszczeń testowych jest zachowanie stałego składu zanieczyszczeń w warunkach badań przez różne ośrodki oraz trudności otrzymania proszku testowego o wymaganych własnościach. To wszystko jest przyczyną bardzo zróżnicowanego zestawu używanych w praktyce zanieczyszczeń testowych. Spośród wielu zaleceń, norm i wniosków dotyczących wyboru i stosowania zanieczyszczeń testowych, podane zostaną najbardziej rozpowszechnione i typowe.

Najczęściej stosuje się granulki o kształtach regularnych oraz rzadziej włókna i selekcyjonowane osady zanieczyszczeń naturalnych. Te ostatnie stosuje się wykorzystując różne piaski, popiół lotny, osad z filtrów stoisk hydraulicznych, osad uzyskany z regeneracji elementów filtracyjnych dokładnego oczyszczania, naturalny namuł ze skrzyń korbowych silników spalinowych, itd.

Jako proszków standardowych przeznaczonych do testowania filtrów hydraulicznych i pneumatycznych używa się najczęściej:

1) proszku szklanego kulistego o wymiarach najczęściej powyżej $1 \div 5$ mikrometrów (przykład osadu z ww. proszku przed-



Rys. 1.20. Osad kulek szklanych wykorzystywanych jako zanieczyszczenie testowe do badań filtrów

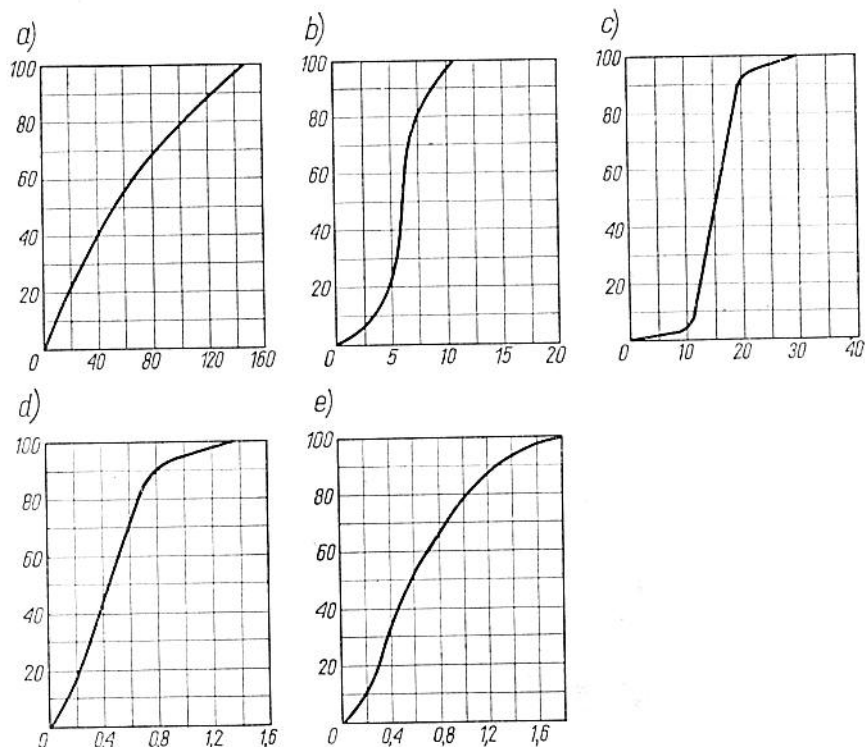
stawia rys. 1.20); najczęściej wykorzystywane składy chemiczne szkła:

I	II	III
PbO — 63,7 ⁰ / ₀	PbO — 68,5 ⁰ / ₀	PbO — 69 ⁰ / ₀
B ₂ O ₃ — 14,6 ⁰ / ₀	B ₂ O ₃ — 28,5 ⁰ / ₀	B ₂ O ₃ — 29 ⁰ / ₀
ZnO — 16,5 ⁰ / ₀	ZnO — 2,0 ⁰ / ₀	ZnO — 2 ⁰ / ₀
SiO ₂ — 5,2 ⁰ / ₀	AgO — 1,0 ⁰ / ₀	

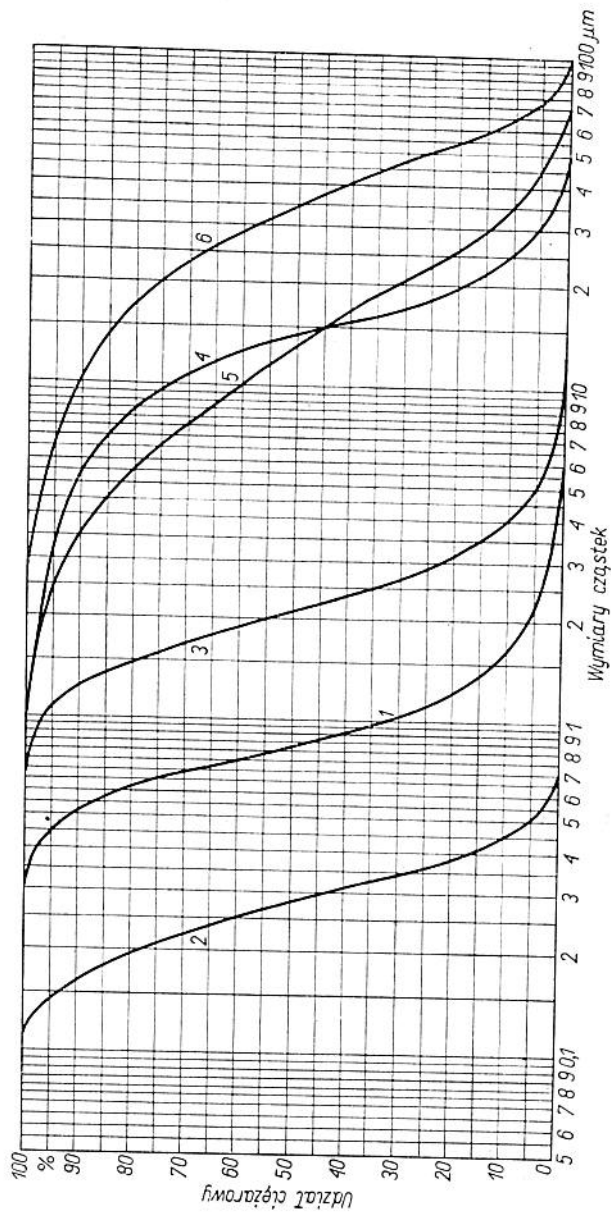
Kulisty proszek szklany jest przeznaczony głównie do badań filtrów hydraulicznych;

2) piasku naturalnego (powyżej 15 μm) wg norm MIL-E-5007B i BS : 1701;

3) pyłu krzemowego (powyżej 1 μm) wg normy MIL-E-5504A;



Rys. 1.21. Przykłady rozkładów wymiarowych proszku testowego: a) piasek naturalny (BS:1701), b) Aloxite 50 (BS:2831), c) Aloxite 225 (BS:2831), d) błękit metylowy (BS:2831), e) chlorek sodu (BS:3928). Na osi odciętych wymiar cząstek w mikrometrach, na osi rzędnych udział procentowy ciężaru odpowiadającego kolejnym wymiarom



Rys. 1.22. Typowe krzywe rozkładu: 1 — sproszkowany dolomit (węglan wapnia i magnezu), 2 — gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), 3 — krzemionka (SiO_2), 4 — węgiel wolframu, 5 — popiół, 6 — cement

4) tlenku aluminium o różnym składzie chemicznym i zakresie wymiarowym cząstek; w Anglii stosuje się wg BS : 2831 tlenek o nazwie Aloxite 50 ($5 \div 10 \mu\text{m}$) oraz Aloxite 225 ($10 \div 20 \mu\text{m}$).

Tylko do badań filtrów powietrza o wolnych przepływach wykorzystuje się błękit metylenowy ($0,01 \div 1,3 \mu\text{m}$), chlorek sodu (średni wymiar cząstek $0,58 \mu\text{m}$), ftalan dwuoktylu (średni wymiar cząstek $0,3 \mu\text{m}$) oraz grafit sproszkowany o wymiarach od $0,01$ do $0,1 \mu\text{m}$.

Rozkłady ciężarowe kilku znormalizowanych rozkładów zanieczyszczeń testowych przedstawiono na rys. 1.21.

Z innych materiałów stosowanych do badań filtrów w charakterze zanieczyszczeń testowych należy wymienić proszki tlenków metali (tlenek żelazawy), metali i stopów metali, żelazo karbonylkowe, pył cynkowy, proszki tworzyw sztucznych, włókna bawełny itd.

Do różnych badań sprawdzających można używać zanieczyszczeń testowych o ściśle określonym składzie chemicznym. Na rys. 1.22 podano sześć przykładów proszków, których krzywe rozkładu ciężarowego określono przy użyciu przyrządu działającego na zasadzie kontrastu elektrycznego Celloseope 202 przez laboratorium Linson Instrument (Szwecja). Krzywe rozkładu sporządzono w ten sposób, że ciężar 100% odpowiada próbce obejmującej wszystkie cząstki od największego do najmniejszego wymiaru w przeciwieństwie do rys. 1.21, na którym krzywe rozkładu (dystrybuanty) sporządzono tak, że udział ciężarowy wzrasta wraz ze wzrostem wymiarów cząstek.

1.4. Podstawowe określenia i klasyfikacja filtrów płynów roboczych

W ustępie tym zebrano niezbędne określenia dotyczące omawianych zagadnień. Mają one na celu usystematyzowanie pojęć i wstępne wprowadzenie do zagadnień omawianych w następnych rozdziałach. Poszczególne hasła podzielono na kilka grup tematycznych. Inne pojęcia i bardziej szczegółowy opis związanych z tymi hasłami zagadnień wprowadzono w dalszych rozdziałach pracy.

a) Płyny robocze, zanieczyszczenia i filtrowanie

Płyn roboczy — nośnik energii hydraulicznej (cieczowej) lub pneumatycznej (gazowej) wykorzystany w budowie maszyn.

Płyn roboczy czysty — płyn jednorodny (monolityczny), tzn.

stanowiący ośrodek ciągły, w którym nie uwzględnia się dyskretnej budowy materii (płyn jednofazowy).

Płyn roboczy zanieczyszczony — płyn niejednorodny zawierający zanieczyszczenia, występujący w postaci mieszaniny faz: podstawowej (rozpraszającej, dyspersyjnej) i rozproszonej (zdypergowanej). Rozproszona faza stała zawieszona w cieczy stanowi *suspensję* lub *zól*, zawieszona w gazie *aerozol* (dym, pył, kurz). Rozproszona faza ciekła w cieczy stanowi *emulsję*, w gazie — *mgłę*. Rozproszona faza gazowa w cieczy tworzy *pianą*.

Zanieczyszczenia płynu roboczego (cieczy i gazu) — szkodliwe dla działania urządzenia płynowego cząstki fazy rozproszonej występujące w mieszaninie z fazą podstawową stanowiącą płyn roboczy. Zanieczyszczenia płynu roboczego stanowią kategorię *mikroobektów*, czyli obiektów o mikroskopijnych wymiarach. W płynie roboczym wyróżnia się *zanieczyszczenia powstałe w sposób bezpośredni* (wprowadzone z płynem) oraz w sposób *pośredni* (wynikłe z działania urządzenia).

Ciecz robocza (*ciecz hydrauliczna, czynnik hydrauliczny, czynnik roboczy, medium*) — element układu hydraulicznego znajdujący się w czasie pracy układu w fazie ciekłej, wypełniający przestrzenie wewnętrzne urządzeń i członów, przeznaczony do wypełniania funkcji przekazywania informacji (sterowania), przenoszenia sił oraz zapewnienia funkcjonalnej współpracy mechanicznych elementów ruchomych.

Zanieczyszczenia testowe (*zanieczyszczenia standardowe, zanieczyszczenia sztuczne*) — zanieczyszczenia o określonym składzie granulometrycznym sztucznie wprowadzane do płynu roboczego, najczęściej w celu zbadania własności filtracyjnych filtru lub działania innych elementów układu płynowego.

Granulometryczny skład zanieczyszczeń płynu roboczego (*rozkład wymiarów zanieczyszczeń*) — zależność procentowej zawartości cząstek zanieczyszczeń w płynie roboczym w funkcji ich wymiarów.

Rozkład (*rozdział, krzywa rozdziału*) *wymiarów zanieczyszczeń* — ilościowe wyrażenie wyników analizy wymiarów (promieni, średnic, powierzchni, objętości, ciężaru) cząstek zanieczyszczeń w postaci całkowitych (komutacyjnych) lub różniczkowych krzywych we współrzędnych: udział ilości cząstek — wymiar (parametr dyspersyjności) przedstawianych najczęściej w postaci znormalizowanej odpowiednio dystrybuanty lub funkcji gęstości rozkładu prawdopodobieństwa.

Stożek dyspersji zanieczyszczeń — odwrotność wartości średnicy cząstki zanieczyszczeń.

Układ monodispersyjny zanieczyszczeń — układ (płyn ro-

boczy — zanieczyszczenia) zawierający cząstki o jednakowej średnicy, tzn. o jednakowym stopniu dyspersji.

Układ polidispersyjny zanieczyszczeń — układ (płyn roboczy — zanieczyszczenia) zawierający cząstki zanieczyszczeń o różnej średnicy, dla którego rozkład ich wielkości można oznaczyć za pomocą analizy dyspersyjnej.

Powierzchnia właściwa zanieczyszczeń — stosunek całkowitej powierzchni zanieczyszczeń do objętości tych zanieczyszczeń.

Koagulacja zanieczyszczeń — specyficzna właściwość drobnych cząstek polegająca na „wzroście” średnicy cząstek zanieczyszczeń w cieczy roboczej w czasie.

Filtrowanie płynu roboczego (mieszaniny) — oddzielanie od siebie faz rozproszonych od ciągłych, znajdujących się w mieszaninie. W przypadku zanieczyszczonych płynów oddzielanie zanieczyszczeń, tj. filtrowanie mieszaniny może odbywać się w sposób mechaniczny przez zatrzymanie cząstek jednej fazy przez materiał filtracyjny w procesie filtracji (sączenia), czyli przepływu płynu przez osrodek porowaty, lub pod działaniem pola sił na płyn i zawarte w nim cząstki albo z wykorzystaniem obu rodzajów filtrowania jednocześnie.

Filtrowanie płynu jest również nazywane oczyszczaniem (*oczyszczanie płynu*) lub też operacją oddzielania, seperowania (seperatory płynowe), odsączenia (sączki płynowe), segregowania lub frakcjonowania zanieczyszczeń znajdujących się w płynie roboczym.

Filtrat (przesącz) — faza płynna mieszaniny przechodząca przez przegrodę filtracyjną, czyli filtrowana ciecz z zanieczyszczeniami.

Sedymentacja — zjawisko osiadania cząstek stałych zawartych w płynie na powierzchni przeszkody w wyniku działania sił na cząstki stałe. W przypadku działania sił ciężkości mamy do czynienia z *sedymentacją grawitacyjną (naturalną)*, w wyniku której cząstki o gęstości większej od gęstości płynu osiadają na dnie naczynia lub na powierzchni dowolnej przeszkody. W przypadku działania sił wymuszonych sztucznie mamy do czynienia z sedymentacją określoną charakterem oddziaływania pola sił na cząstkę.

Kolmatacja — zjawisko osadzania się cząstek zanieczyszczeń zawartych w płynie podczas przepływu tego płynu przez materiał filtracyjny.

Obliteracja (zarastanie, zamulanie) — zjawisko występujące przy przepływach przez szczeliny włoskowate, polegające na adsorbowaniu cząstek cieczy przez ścianki szczeliny (kapilary) i narastaniu grubości nieruchomej części (warstwy granicznej cieczy), a przez to powodujące zmniejszenie się przekroju czynnego szczeliny (kapilary). Obliteracja całkowita jest to zjawisko zarastania

całkowitego szczeliny polegające na działaniu sił międzycząsteczkowych, sił oddziaływania elektrycznego oraz sił mechanicznych na granicy ośrodków fazy ciekłej (cieczy hydraulicznej) i stałej (ścianek wewnętrznych szczelin; kapilar) powodujące zjawisko adsorpcji, wskutek czego przy ścianie tworzy się quasi-twarda warstwa lub warstwa o anormalnej lepkości, różnica się pod względem wielkości i własności od lepkości warstwy środkowej; w wyniku tego część warstwy granicznej będzie utrwalona na powierzchni ścianki (metal) i nabierze cech własności ciała stałego.

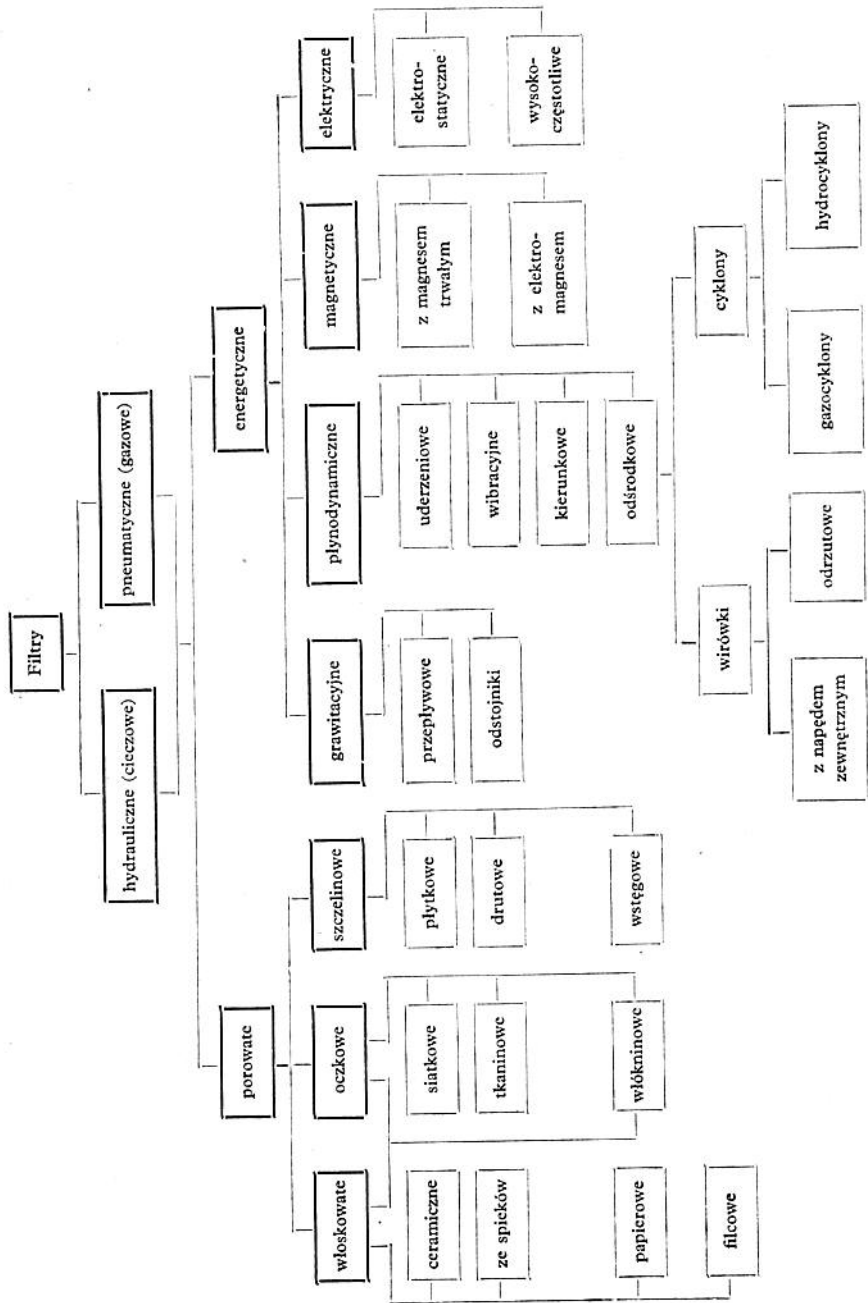
b) Filtry płynów roboczych

Podział filtrów płynowych jest dokonywany głównie w zależności od: zasady i sposobu oczyszczania płynu roboczego, sposobu zamocowania filtra, wyposażenia filtra, sposobu wykonania wkładu filtracyjnego, umiejscowienia filtra w układzie, sposobu włączenia, roli filtra w układzie, przeznaczenia, parametrów filtra i innych cech konstrukcyjnych.

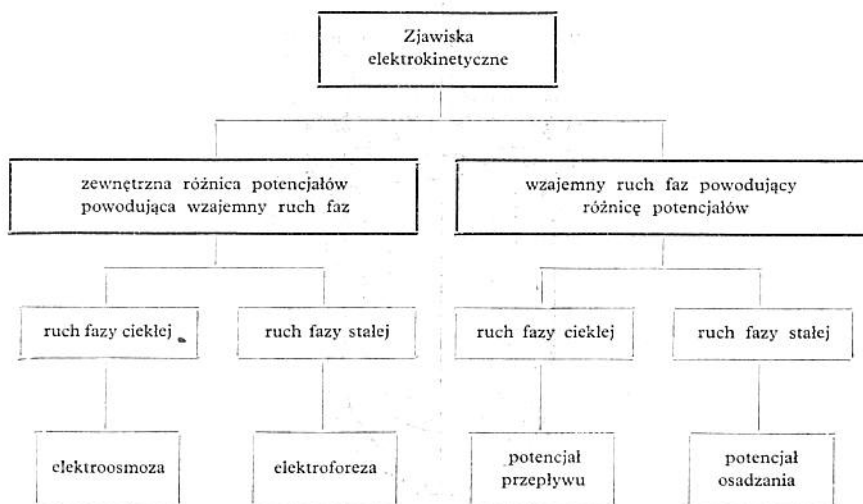
Ogólny podział *filtrów płynów roboczych* stosowanych w urządzeniach płynowych przedstawiono na rys. 1.23. Podział ten nie uwzględnia filtrów specjalnych wykorzystujących różne zjawiska fizyko-chemiczne (np. absorpcję). Zagadnienia te nie wchodzą w zakres opracowania klasyfikacyjnego filtrów płynów roboczych ze względu na małe rozpowszechnienie urządzeń filtracyjnych płynów roboczych wykorzystujących tego typu zjawiska. Przykładem klasyfikacji o charakterze peryferyjnym dla zastosowań w układach cieczowych jak podział zjawisk elektrokinetycznych występujących w filtrach cieczy (rys. 1.24).

Ogólny podział filtrów płynów roboczych ze względu na stan skupienia płynu przechodzącego przez filtr wyodrębnia dwie zasadnicze kategorie *filtrów: hydrauliczne (cieczowe) i pneumatyczne (gazowe)* oraz ze względu na zasadę działania — *filtry porowate i energetyczne*.

Podziału szczegółowego filtrów porowatych dokonano przyjmując za kryterium podziału wzajemny stosunek wymiarów objętości przepływowej poru w filtrze (rys. 1.25). Dla uproszczenia przyjęto na rys. 1.25 idealny kształt poru w postaci prostopadłościanu, zdając sobie sprawę z tego, że w praktyce pory takie prawie nigdy nie występują. Rozróżniać będziemy stosunki między trzema wymiarami porów: długością l , szerokością h i wysokością y , określającymi objętość przepływową poru. *Filtry włoskowate* to takie, w których wymiary porów spełniają warunki: l dużo większe od y i h ; h i y w przybliżeniu równe sobie. Dla *filtrów oczkowych*: h i y w przybliżeniu równe sobie, l małe w porównaniu z h i y . Dla *filtrów szczelinowych* l dowolne, h dużo większe od y .



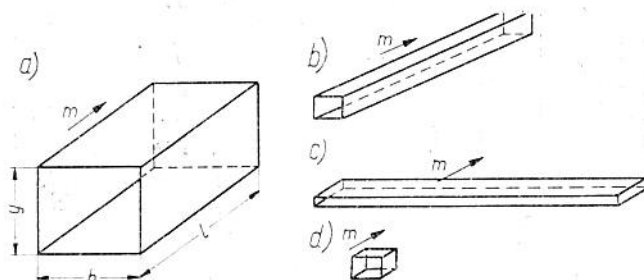
Rys. 1.23. Podział ogólny filtrów płynów roboczych



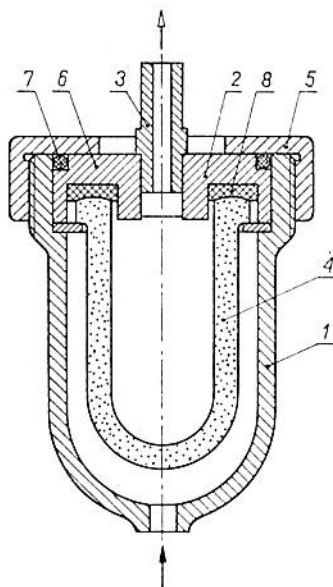
Rys. 1.24. Wykorzystanie zjawisk elektrokinetycznych występujących w filtrach cieczy

Inny podział (nie wyodrębniony na rys. 1.23) klasyfikuje filtry na: *powierzchniowe*, do których zalicza się filtry oczkowe i niektóre *filtry włoskowate* i *szczelinowe* oraz *wgłębne*, do których należą głównie filtry włoskowate.

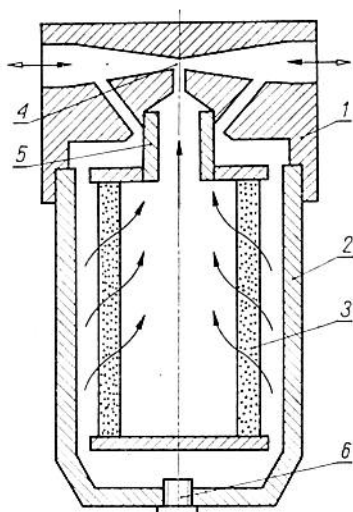
Poniżej podano określenia filtrów ujętych ogólną klasyfikacją oraz filtrów, które ze względu na duże rozpowszechnienie zasługują na szczególne wyodrębnienie. Ponadto zamieszczono również te definicje filtrów porowatych, które określają również niektóre cechy związane z ich budową lub działaniem. Niektóre



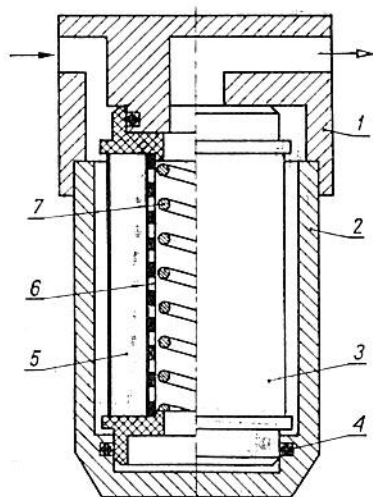
Rys. 1.25. Kryterium podziału filtrów porowatych z uwzględnieniem kształtu poru: a) schemat poru i jego wymiarowanie (l — długość przepływu, y — wysokość przepływu, h — szerokość przepływu, m — kierunek przepływu), b) por włoskowaty, c) por szczelinowy, d) por oczkowy



Rys. 1.26. Filtr ceramiczny; 1 — osłona, 2 — głowica, 3 — króciec, 4 — wkład filtracyjny, 5 — nakrętka, 6 — tuleja zaciskowa, 7, 8 — uszczelnienia



Rys. 1.27. Filtr proporcjonalny ze spieków; 1 — głowica, 2 — osłona, 3 — wkład filtracyjny, 4 — dysza Venturiego, 5 — odrzutnik cieczy, 6 — korek



Rys. 1.28. Filtr z wkładem papierowym; 1 — głowica, 2 — osłona, 3 — wkład filtracyjny, 4 — uszczelnienie, 5 — papier filtracyjny, 6 — siatka podporowa, 7 — ruszt sprężynowy wkładu

z określeń zostały zilustrowane przykładami schematów budowy filtrów.

Filtr płynu — urządzenie do oddzielania od siebie faz: głównie stałej i ciekłej lub stałej i gazowej znajdujących się w mieszaninie.

Filtr hydrauliczny (cieczowy) — filtr stosowany w układach napędu i sterowania hydraulicznego w celu usuwania zanieczyszczeń z cieczy.

Filtr pneumatyczny (gazowy) — filtr stosowany w układach napędu i sterowania pneumatycznego w celu usuwania zanieczyszczeń z gazu.

Filtr porowaty — filtr którego element filtrujący jest wykonany z materiału porowatego.

Filtr włoskowaty (kapilarny) — filtr porowaty z wkładem filtracyjnym, którego pory mają postać rurek lub szczelin włoskowatych (kapilar) regularnych lub nieregularnych. Do filtrów włoskowatych zalicza się głównie filtry ceramiczne, filtry ze spieków, filtry papierowe oraz niektóre filtry włókninowe.

Filtr ceramiczny (rys. 1.26) — filtr włoskowaty, którego element filtrujący jest wykonany z materiału ceramicznego.

Filtr ze spieków (rys. 1.27) — filtr włoskowaty, którego element filtrujący jest wykonany ze spiekanych proszków metalowych lub granulek innych materiałów.

Filtr papierowy (rys. 1.28) — filtr włoskowaty, którego element filtrujący jest wykonany z przepuszczalnego papieru.

Filtr filcowy (rys. 1.29) — filtr włoskowaty, którego element filtrujący jest wykonany z materiału filcowego.

Filtr oczkowy — filtr porowaty z wkładem z materiału, którego pory mają kształt oczek.

Filtr siatkowy (rys. 1.30) — filtr oczkowy, którego element filtrujący jest wykonany z siatki (metalowej, z włosia, z włókien sztucznych).

Filtr tkaninowy — filtr oczkowy, którego element filtrujący jest wykonany z przepuszczalnej tkaniny.

Filtr włókninowy — filtr porowaty, którego element filtracyjny jest wykonany z włókniny. Filtry włókninowe znajdują się na pograniczu filtrów włoskowatych i filtrów oczkowych, zależnie od struktury włókniny.

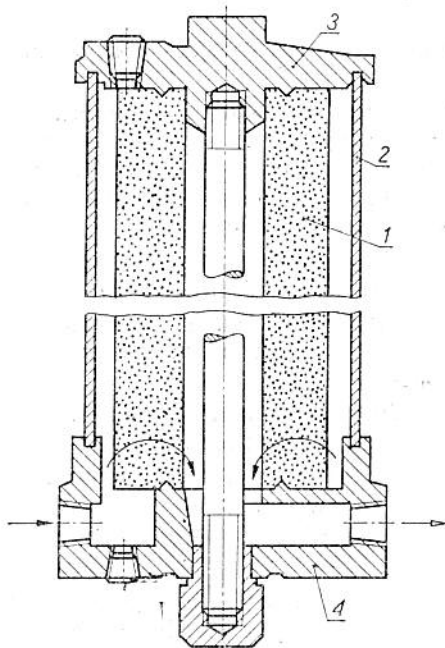
Filtr szczelinowy (rys. 1.31) — filtr porowaty (włoskowaty lub oczkowy), którego układ filtracyjny ma szczeliny utworzone w wyniku składania płytek, nawijania drutu lub wstęgi. Filtry szczelinowe dzielą się na: filtry płytkowe, filtry drutowe i filtry wstęgowe. Filtry szczelinowe są też zwane krawędziowymi.

Filtr płytkowy — filtr szczelinowy, którego element filtrujący składa się ze stosu płytek tworzących szczeliny.

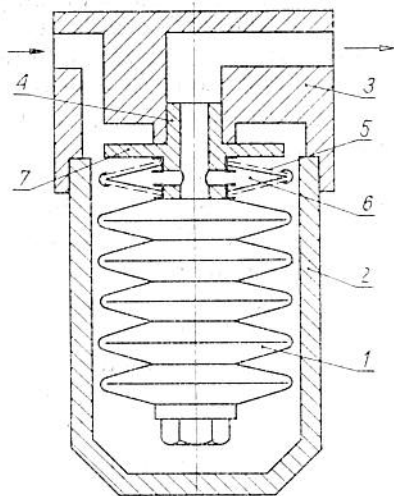
Filtr drutowy (druciany) — filtr szczelinowy, którego element filtrujący jest wykonany z drutu profilowanego lub o stałym przekroju.

Filtr wstęgowy — filtr szczelinowy, którego element filtrujący jest wykonany ze wstęgi metalowej, papierowej lub z tworzywa.

Filtr energetyczny — filtr, którego działanie polega na odmienności skutków oddziaływania pola sił na płyn i zawarte



Rys. 1.29. Filtr z wkładem filcowym; 1 — wkład filtracyjny, 2 — osłona, 3 — pokrywa, 4 — kadłub

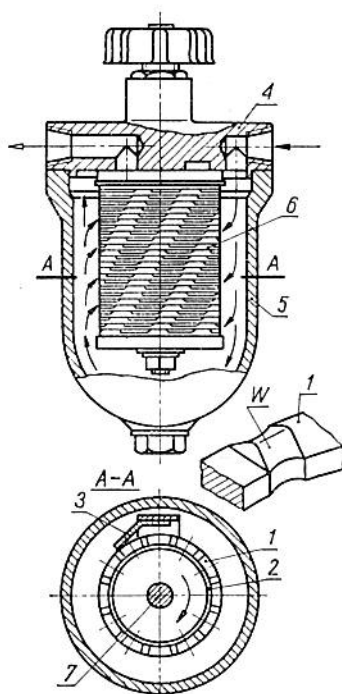


Rys. 1.30. Filtr siatkowy; 1 — wkład filtracyjny talerzowy z siatki, 2 — osłona, 3 — głowica, 4 — tuleja, 5 — siatka filtracyjna, 6 — siatka podporowa, 7 — deflektor

w nim zanieczyszczenia. Do filtrów energetycznych zaliczamy filtry grawitacyjne, filtry płynodynamiczne, filtry magnetyczne i filtry elektryczne.

Filtr odśrodkowy (centryfuga) — filtr płynodynamiczny, w którym oddzielanie fazy mieszaniny odbywa się pod działaniem siły odśrodkowej.

Wirówka — filtr odśrodkowy, którego wirnik wprowadza mieszaninę w ruch wirowy powodujący oddzielenie się cząstek faz o różnych gęstościach. Wirówki dzieli się na: wirówki z napę-

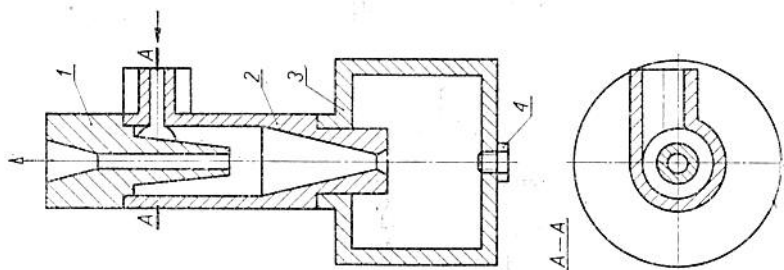


Rys. 1.31. Filtr szczelinowy wstęgowy; 1 — wstęga z występami odległościowymi (w), 2 — ruszt, 3 — zgarniacz, 4 — głowica, 5 — osłona, 6 — wkład filtracyjny, 7 — wał pokręta oczyszczania

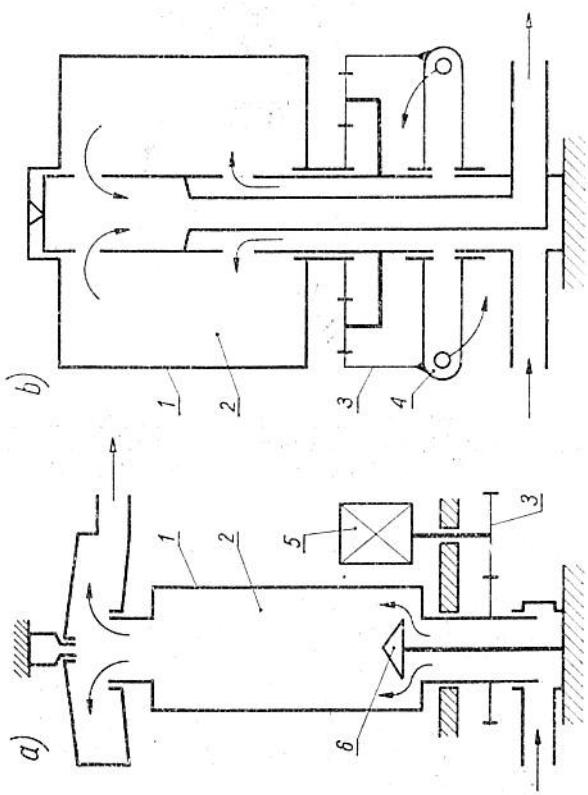
dem zewnętrznym i wirówki odrzutowe (reakcyjne lub z napędem własnym) (rys. 1.32).

Cyklon (rys. 1.33) — filtr odśrodkowy, którego ukształtowanie powoduje ruch wirowy przepływającej mieszaniny, w czasie którego cząstki zanieczyszczeń ulegają zagęszczaniu się w części przewodu przepływowego. Cyklony najczęściej mają oprócz przewodu wyjściowego również przewód upustowy dla części płynu bardziej zanieczyszczonej. Cyklony dzieli się na: *hydrocyklony* (rys. 1.33) i *gazocyklony*.

Filtr magnetyczny (z magnesem stałym, z elektromagnesem) — filtr energetyczny, w którym oddzielenie faz odbywa się pod



Rys. 1.33. Hydrocyklon;
 1 — głowica, 2 — osłona,
 3 — odstożnik, 4 — korek



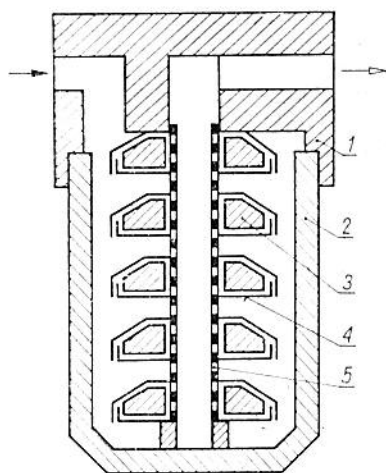
Rys. 1.32. Wirówka: a) z napędem zewnętrznym, b) z napędem od-
 rzutowym; 1 — wirnik, 2 — komora osadczą, 3 — reduktor, 4 — dy-
 sza wypływowa, 5 — silnik napędu wirówki, 6 — odrzutnik płynu

wpływem pola magnetycznego, które może być wytworzone przez magnes stały (rys. 1.34) lub elektromagnes.

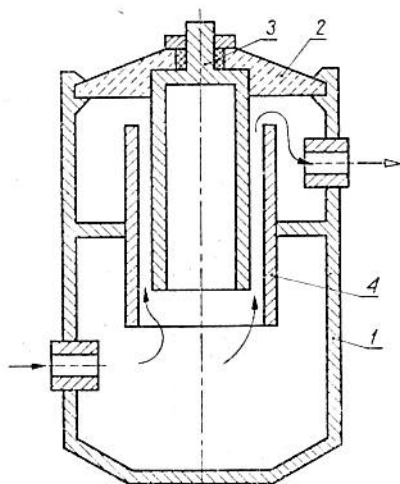
Filtr elektryczny (elektrofiltr) (rys. 1.35) — filtr energetyczny, w którym oddzielenie fazy stałej od płynnej odbywa się pod wpływem działania elektrostatycznego pola sił lub sił elektrodynamicznych o wysokiej częstotliwości. Filtry elektryczne dzieli się na *filtry elektrostatyczne* (rys. 1.35) i *wysokoczęstotliwościowe*.

Filtr grawitacyjny (rys. 1.36) — filtr energetyczny, w którym osadzanie się cząstek stałych odbywa się pod wpływem działania siły ciężkości. Filtry grawitacyjne dzieli się na *filtry przepływowe* i *odstojniki*.

Filtr przepływowy — filtr w którym znajduje się przestrzeń do osadzania się zanieczyszczeń pod wpływem działania sił ciężkości. W filtrach przepływowych wyróżnia się *osadnik (sedymentator)*. Jest to zbiornik przeznaczony do osadzania się przeważnie



Rys. 1.34. Filtr magnetyczny z magnesami stałymi; 1 — głowica, 2 — osłona, 3 — magnes stały, 4 — osłona magnesów, 5 — ruszt siatkowy

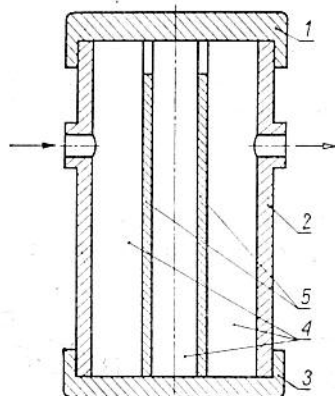


Rys. 1.35. Filtr elektrostatyczny; 1 — osłona, 2 — głowica izolacyjna, 3 — elektroda centralna, 4 — elektroda uziemiona

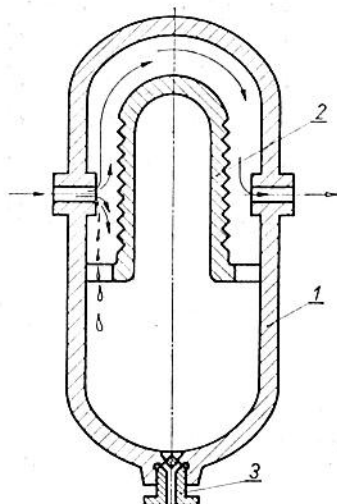
zanieczyszczeń w dużych ilościach zawartych w płynie. Osadnik może być samodzielnym urządzeniem lub elementem składowym filtru, zabezpieczającym warstwę filtrującą przed dostaniem się do niej grubszych zanieczyszczeń.

Odstoжник (dekanter) — zbiornik grawitacyjny bez warstwy filtrującej lub zbiornik o bardzo wolnym przepływie płynu, przeznaczony do osadzania się na jego dnie unosin (cząstek unoszonych przez płyn).

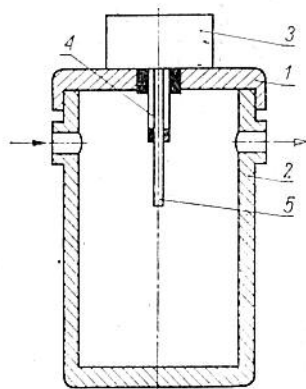
Filtr plynodynamiczny — filtr, w którym oddzielenie fazy stałej od fazy ciekłej odbywa się pod działaniem sił plynodynamicznych. Do filtrów plynodynamicznych zalicza się: *filtry uderzeniowe*, *filtry odśrodkowe*, *filtry przepływowe* i *filtry wibracyjne*.



Rys. 1.36. Filtr grawitacyjny; 1 — pokrywa górna, 2 — osłona, 3 — pokrywa dolna, 4 — komory osadcze, 5 — przegrody



Rys. 1.37. Filtr uderzeniowy; 1 — osłona, 2 — przegroda stała, 3 — zawór spustowy



Rys. 1.38. Filtr wibracyjny; 1 — pokrywa, 2 — osłona, 3 — generator drgań, 4 — rurka sprężysta, 5 — pręt drgający

Filtr uderzeniowy (rys. 1.37) — filtr płynodynamiczny, w którym oddzielenie faz następuje w wyniku uderzenia mieszaniny o przegrodę stałą lub ciekłą i zmiany kierunku prędkości cząstek zanieczyszczeń względem kierunku przepływającego płynu. Filtry uderzeniowe dzieli się na *filtry z przegrodą stałą* i *przegrodą ciekłą*.

Filtr wibracyjny (rys. 1.38) — filtr płynodynamiczny, w którym oddzielenie faz odbywa się w wyniku koagulacji cząstek zanieczyszczeń w polu sił drgającego płynu.

Filtr kierunkowy — filtr płynodynamiczny, w którym oddzielenie faz odbywa się w wyniku zmiany kierunku przepływu płynu i cząstek zanieczyszczeń wskutek ukształtowania pola prędkości przepływającego płynu.

c) Charakterystyki geometryczne materiałów porowatych

Pory (prześwity, otwory, kanały) materiału filtracyjnego — przestrzenie wolne w materiale filtracyjnym.

Wymiar poru — największy lub średni wymiar zastępczy (średnica lub promień) otworu przelotowego wkładu filtracyjnego określony najczęściej metodą wydmuchiwania gazu przez nasycyony cieczą wkład.

Pełną charakterystykę geometryczną poru określają wymiary tworzące wolną przestrzeń (objętość) poru: długość w kierunku przepływu płynu oraz szerokość i wysokość charakteryzujące przekrój przepływowy płynu.

Wysokość szczeliny — średnia odległość między elementami tworzącymi szczelinę filtracyjną odnosi się również do filtrów (krawędziowych).

Wymiar oczka (prześwit) — średni rozstaw między wątkiem a osnową w powierzchni tkaniny filtracyjnej.

Porowatość materiału filtracyjnego — stosunek objętości porów znajdujących się w materiale filtracyjnym do całkowitej objętości materiału filtracyjnego.

Porowatość materiału filtracyjnego — stosunek objętości porów biorących udział w procesie filtrowania do całkowitej objętości materiału filtracyjnego.

Porowatość dynamiczna (przepływowa) — stosunek objętości porów, w których istnieje ruch cieczy w procesie filtrowania z uwzględnieniem porów powstałych w wyniku osadzania się zanieczyszczeń, do całkowitej objętości materiału filtracyjnego i osadu.

Porowatość zewnętrzna — stosunek objętości porów przelotowych i zewnętrznych (nieprzelotowych) do całkowitej objętości materiału filtracyjnego.

Porowatość wewnętrzna („martwa”, zamknięta, nieefektywna) — stosunek objętości porów zamkniętych w materiale filtracyjnym do całkowitej objętości materiału filtracyjnego.

d) Charakterystyki przepływowe materiałów filtracyjnych i filtrów

Stan (charakter) przepływu przez materiał filtracyjny — zależność między ciśnieniem filtrowania a natężeniem przepływu cieczy określana mianem *przepływu laminarnego* (uwarstwionego), wtedy, gdy ta zależność jest liniowa, mianem *przepływu molekularnego*, gdy ta zależność jest nieliniowa, oraz *mianem przepływu turbulentnego (burzliwego)*, gdy zależność między spadkiem ciśnienia a natężeniem przepływu jest nieliniowa, natomiast natężenie przepływu jest mniejsze niż wynikałoby to z zależności liniowej.

Spadek ciśnienia w materiale filtracyjnym — różnica ciśnienia między stroną wejściową a wyjściową warstwy filtracyjnej.

Straty ciśnienia w filtrze — spadek ciśnienia we wkładzie filtracyjnym łącznie z obudową albo różnica ciśnienia na wejściu i na wyjściu z filtru.

Opór przepływu przez filtr — współczynnik wiążący zależność natężenia przepływu płynu roboczego przez czysty filtr ze spadkiem ciśnienia na filtrze i lepkością płynu.

Charakterystyka przepływowa filtru (lub charakterystyka hydrauliczna filtru) — zależność spadku ciśnienia od natężenia przepływu niezanieczyszczonej cieczy roboczej przez filtr.

Przepływność materiału filtracyjnego (współczynnik przepływu przez filtr w nominalnych warunkach pracy.

Przepływność materiału filtracyjnego (współczynnik przepuszczalności, jednostkowe natężenie przepływu) — natężenie przepływu przez jednostkową powierzchnię warstwy materiału filtracyjnego przy określonym spadku ciśnienia w danej temperaturze i dla danego płynu.

Jednostka przepływności: *darcy* — zdolność przepuszczania przez powierzchnię 1 cm^2 przekroju poprzecznego porowatego materiału filtracyjnego $1 \text{ cm}^3/\text{s}$ cieczy, o lepkości 1 centypuaza, przy spadku ciśnienia filtracji 1 at na 1 cm grubości i przy przepływie laminarnym. W praktyce przepływność może być wyrażona też w jednostkach 10^{-8} cala², gdzie $1 \text{ darcy} = 0,1530 \cdot 10^{-8}$ cala = $= 0,9869 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2$. Stosowane jest również określenie 1 darcy = $= 0,9869 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2$, gdzie lepkość jest mierzona w puazach.

Fikcyjna szybkość filtrowania (filtracji) — stosunek natężenia przepływu cieczy roboczej do powierzchni warstwy filtracyjnej lub do powierzchni czynnej elementu filtracyjnego z wyłączeniem powierzchni styku materiału filtracyjnego z podporami.

Prędkość filtrowania (średnia prędkość filtracji, średnia prędkość filtrowanego płynu) — średnia prędkość płynu w porach obliczona jako stosunek fikcyjnej prędkości filtrowania do porowatości dynamicznej lub całkowitej materiału filtracyjnego.

Dopuszczalny spadek ciśnienia filtrowania — najwyższa różnica ciśnień manometrycznych przed i za elementem filtrującym, przy której jest zapewniona poprawna praca wkładu filtracyjnego i elementów pomocniczych filtra pod względem funkcjonalnym i wytrzymałościowym, w czasie i warunkach przewidzianych ogólnymi wymaganiami dla filtrów.

Rzeczywisty spadek ciśnienia filtrowania — różnica ciśnień przed i za elementem filtrującym (filtrem) w procesie filtrowania.

Niszczący spadek ciśnienia filtrowania — różnica ciśnień przed i za elementem filtrującym, przy której odbywa się badanie wytrzymałości mechanicznej wkładów filtrujących i zespołów pomocniczych (złączy i przewodów doprowadzających) filtra, stanowiąca najczęściej trzykrotną wartość ciśnienia próbnego.

Ciśnienie próbne (badawcze) filtru — ciśnienie (płynu), przy którym odbywa się badanie filtra na szczelność.

e) Charakterystyki filtracyjne

Efektywność filtrowania — umowny wskaźnik oceny ilościowej zdolności zatrzymywania (lub przepuszczania) zanieczyszczeń zawartych w płynie roboczym przez filtr określany albo na podstawie parametrów konstrukcyjnych filtra albo na podstawie doświadczalnych badań parametrów zanieczyszczeń przed i za filtrem w procesie filtrowania lub też w inny sposób.

Dokładność oczyszczania filtru — wymiar najmniejszych cząstek zanieczyszczeń zatrzymywanych przez filtr.

Absolutna dokładność oczyszczania filtru — wymiar najmniejszych cząstek zanieczyszczeń podawany najczęściej w mikrometrach zatrzymywanych przez filtr w ilości 100% lub 99,99% ogólnej liczby mierzalnych zanieczyszczeń.

Nominalna dokładność oczyszczania filtru — wymiar najmniejszych cząstek zanieczyszczeń podawany najczęściej w mikrometrach zatrzymywanych przez filtr w umownej ilości z ogólnej liczby mierzalnych zanieczyszczeń (w ilości wynoszącej najczęściej 98%, 95% lub 50%).

Efektywność (skuteczność) filtrowania — umowny wskaźnik skuteczności zatrzymywania zanieczyszczeń określający jego skutek ilościowy lub jakościowy, najczęściej w postaci objętości całkowitej lub ciężaru wszystkich zatrzymanych zanieczyszczeń przez filtr w określonym odcinku czasu.

Charakterystyka efektywności przepuszczania filtra (charakterystyka przepuszczania zanieczyszczeń przez filtr) — zależność stosunku ilości zanieczyszczeń przed filtrem do ilości zanieczyszczeń po filtrowaniu w funkcji ich wymiarów określona doświadczalnie na podstawie pomiarów statystycznych w zakresie mierzalnych wymiarów zanieczyszczeń, wyrażona najczęściej w procentach.

Charakterystyka efektywności odfiltrowania filtra (charakterystyka odfiltrowania zanieczyszczeń przez filtr) — dopełnienie do 100% charakterystyki efektywności przepuszczania filtra, wyrażające procentowo stosunek różnicy ilości zanieczyszczeń przed i za filtrem do ilości zanieczyszczeń przed filtrem w funkcji wymiarów zanieczyszczeń.

Względna zdolność zatrzymywania zanieczyszczeń (względna skuteczność filtrowania) — ilość zanieczyszczeń (mg, sztuk, mm³) zatrzymana na 1 cm² pracującej powierzchni filtra przy stałym ciśnieniu filtrowania (najczęściej 0,5 kG/cm²) i nominalnych warunkach pracy.

f) Inne określenia związane z filtrami płynów roboczych

Cechy konstrukcyjne filtra — zespół parametrów określających własności konstrukcyjne i eksploatacyjne filtra, do których zalicza się ciśnienie nominalne z pulsacją i bez, dopuszczalne (nominalne) natężenie przepływu, dokładność (charakterystyka) filtrowania, zakres temperatur pracy, płyn roboczy, zakres zmian lepkości płynu filtrowanego, dopuszczalny wskaźnik spadku ciśnienia filtrowania, wskaźniki gabarytowe i ciężarowe, wyposażenie dodatkowe, możliwości (sposoby) regeneracji wkładu filtracyjnego.

Części składowe filtra (elementy) — podstawowe zespoły konstrukcyjne filtra, do których zalicza się obudowę, wkład filtracyjny, osadnik, wyposażenie pomocnicze oraz części przyłączeniowe.

Odwracalność (rewersyjność) filtra — zdolność filtra do pracy w obu kierunkach przepływu.

Sposób włączenia filtrów — umiejscowienie w układzie płynowym filtrów, zależnie od budowy układu i zastosowanych członów układu, przez stosowanie filtrów w przewodach ssawnych, w przewodach tłocznych (ciśnieniowych), w elementach układu, w przewodach spływowych oraz w zbiornikach płynu roboczego.

Przełot filtra (średnica nominalna przełotu) — wielkość odpowiadająca największej średnicy wewnętrznej przewodów i kanałów przepływowych filtra i części przyłączeniowych.

Filtr ssawny — filtr umocowany w otworze ssawnym układu przed generatorem ciśnienia lub generatorem przepływu płynu roboczego.

Filtr spływowy — filtr umieszczony w przewodzie spływowym układu na końcu linii pływowej, w którym najczęściej filtrowanie odbywa się pod ciśnieniem „spływu” instalacji.

Filtr tłoczny — filtr umieszczony w przewodzie tłocznym układu między generatorem ciśnienia lub przepływu płynu roboczego a urządzeniem sterującym w linii ciśnienia roboczego instalacji pływowej.

Mikrofiltr — filtr do oczyszczenia mieszanin zawierających cząstki stałe zanieczyszczeń o najmniejszych wymiarach szkodliwych dla pracy elementów układu (najczęściej o wymiarach w zakresie 0,5 do 10 μm), rzadziej urządzenie dokładnego oczyszczania o małych wymiarach gabarytowych.

Filtry komorowe (zbiornikowe) — urządzenia oczyszczające zainstalowane w zbiorniku płynu roboczego, do których są zaliczane zbiornikowe filtry powietrza (dla zbiorników zamkniętych) i otwarty filtr wlewowy z pokrywą, filtr spustowy umieszczony na przewodzie odpływowym układu, filtry wewnętrzne zbiornika, najczęściej w postaci koszy z wkładami magnetycznymi, oraz filtry hydrauliczne ssawne lub spływowe połączone konstrukcyjnie ze zbiornikiem.

Filtr o wymuszonym przepływie — filtr z wymuszonym przepływem płynu roboczego przez element filtrujący, bez możliwości jego omięcia.

Filtr upustowy (filtr obejściowy) — filtr, w którym część doprowadzonego płynu roboczego musi lub może ominąć element filtrujący poprzez wbudowane zawory lub inne drogi obejścia.

Filtr sprzężony (zestaw filtracyjny) — zestaw z kilku filtrów o różnych parametrach, połączonych równolegle lub szeregowo.

Filtr absolutny — filtr określający zanieczyszczenia zgodnie z pojęciem absolutnej dokładności oczyszczania.

Filtr nominalny — filtr określający zanieczyszczenia zgodnie z pojęciem nominalnej dokładności oczyszczania.

Oczyszczanie wkładu filtracyjnego (patrz też regeneracja) — usuwanie części lub całości zanieczyszczeń osiadłych na wkładzie filtracyjnym poprzez wbudowanie dodatkowych urządzeń związanych z konstrukcją filtra, dokonywane ręcznie, mechanicznie lub automatycznie, w zasadzie bez konieczności demontażu filtra lub też dokonywane w czasie jego pracy.

Regeneracja wkładu filtracyjnego filtra — proces oczyszczania

nia wkładu filtracyjnego z osiadłych na jego powierzchni i w głębi zanieczyszczeń. Regeneracja może być dokonana przez mycie lub płukanie wkładu filtracyjnego w specjalnych cieczach, przez przepuszczenie cieczy lub gazu w kierunku przeciwnym do kierunku filtrowania, przez poddanie drganiom wkładu i cieczy myjącej, przez wypalanie, przez oddziaływanie chemiczne, przez poddanie ograniczonej powierzchni wkładu zalanego cieczą intensywnej kawitacji, przez działanie polami sił odśrodkowych albo przez inne działania lub też przez połączenie wielu zasad regeneracji jednocześnie (patrz rozdział 7).

Maksymalna temperatura pracy filtru — najwyższa temperatura cieczy roboczej ustalona w czasie ciągłej pracy urządzenia hydraulicznego, w której praca filtru jest jeszcze poprawna.

Niezawodność działania filtru — wskaźnik określający prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy filtru w określonym czasie i określonych warunkach pracy.

1.5. Niezawodność urządzeń płynowych

1.5.1. Uwagi ogólne

W odróżnieniu od urządzeń elektronicznych i częściowo układów mechanicznych, zagadnienie *niezawodności urządzeń płynowych* praktycznie nie zostało jeszcze opracowane. Jest to spowodowane między innymi dużą większą ilością i różnorodnością parametrów opisujących elementy i układy płynowe w porównaniu z elementami i układami np. elektronicznymi.

Układy hydrauliczne, elektrohydrauliczne, pneumohydrauliczne itp. składają się z dużej liczby elementów o różnych zasadach działania. Wśród nich elementy hydrauliczne mają podstawowe znaczenie, szczególnie tam, gdzie jest niezbędna znaczna szybkość poruszania, dokładność i duża trwałość w ciężkich warunkach pracy. Łatwo przystosowalne do sterowania elektrycznego, mogą rozwijać momenty wielokrotnie większe od rozwijanych w urządzeniach elektrycznych o tych samych rozmiarach i ciężarze. Przy pracy ciągłej charakteryzuje je największa wartość stosunku gabarytów urządzenia do mocy. Sprawność urządzeń hydraulicznych jest bliska sprawności silników elektrycznych i wynosi 85 do 95% przy znamionowanych wartościach momentu i prędkości. Wymienione zalety przeważają nad wadami, do których należy zaliczyć niedogodną obsługę sieci przewodów hydraulicznych, możliwość występowania groźnych wybuchem przecie-

ków czynnika roboczego, podatność na zakłócenia i stosunkowo wysokie koszty.

Zasadniczym źródłem zakłóceń pracy elementów hydraulicznych jest ciecz robocza, będąca w większości spotykanych przypadków olejem mineralnym lub syntetycznym. Oprócz niewątpliwie pozytywnej roli, jaką spełnia olej w układzie (poza oczywiście, zadaniem zasadniczym — przenoszeniem energii), polegającej na smarowaniu i uszczelnianiu części ruchomych, olej wpływa również na zmniejszenie pewności pracy układu. Chodzi mianowicie o zmianę lepkości z temperaturą (np. w przypadku oleju parafinowanego jest to 110-krotna zmiana przy zmianie temperatury od 38 do -18°C), powstawanie dużych szczytów ciśnienia i opóźnień w liniach przesyłowych, spowodowanych bezwładnością oleju i przede wszystkim wprowadzenie zanieczyszczeń do układu. Zarówno cząstki zanieczyszczeń o wymiarach kilku dziesiątych części milimetra jak i mniejsze, rzędu mikrometrów, spowodować mogą przerwę w działaniu urządzenia. Całkowite wyeliminowanie zanieczyszczeń jest rzeczą niemożliwą, jeżeli wziąć pod uwagę, jak wiele czynników powoduje ich wnikanie do czynnika roboczego. Kontakt cieczy z atmosferą, bezpośrednie lub przez elementy układu wprowadzanie zanieczyszczeń podczas napełniania zbiornika albo w czasie wymiany elementów obwodu hydraulicznego, zanieczyszczanie cieczy cząstkami lakierów, farb i innych pokryć wewnętrznych, głównie zbiornika i przewodów oraz produktami ścierania współpracujących elementów ruchomych, czy wreszcie powstawanie produktów chemicznego oddziaływania czynnika roboczego na ścianki układu i chemicznego starzenia się czynnika są niemożliwymi do uniknięcia ubocznymi efektami pracy układu. Skonstruowanie układu pracującego poprawnie wymaga więc uwzględnienia już w stadium obliczeń wpływu wszystkich tych czynników.

Zawarte w cieczy roboczej zanieczyszczenia są szczególnie niebezpieczne dla poprawnej pracy wszelkiego rodzaju elementów typu impedacyjnego, a więc oporów hydraulicznych, dławików, dyszek o niewielkich średnicach otworów wylotowych oraz elementów ruchomych, tworzących wąskie szczeliny między współpracującymi powierzchniami. Rozpatrywanie każdego z wymienionych elementów oddzielnie byłoby niecelowe i zbyt pracochłonne. Ogólniejsze wnioski można wyciągnąć zastępując ich modelem, możliwie dokładnie odtwarzającym rzeczywiste warunki pracy. Można przyjąć, że szczeliny mikronowe, których najmniejsze wymiary w przekroju normalnym do kierunku przepływu są rzędu mikrometrów, są dokładnymi modelami elementów typu impedacyjnego.

Istnieje wiele opracowań na temat charakterystyk szczelin

idealnych różnego ukształtowania dotyczących przepływu płynów. Znane powszechnie wzory określające zależność ciśnienia płynu od prędkości lub natężenia przepływu i temperatury płynu były wielokrotnie sprawdzone doświadczalnie. Oprócz potwierdzenia słuszności większości z nich z przeprowadzonych eksperymentów wynikły nowe, ciekawe wnioski. Stwierdzono bowiem istnienie *obliteracji* (patrz ust. 1.4), w wyniku której następuje stopniowe zmniejszanie czynnego przekroju mikroszczeliny, nawet przy braku w badanym czynniku cząstek zanieczyszczeń o wymiarach, które mogłyby powodować zatrzymanie ich przez szczelinę na skutek różnic wymiarowych. Zjawisko to nie jest jeszcze dostatecznie wyjaśnione. Doświadczalnie ustalono jedynie, że szybkość obliteracji wzrasta ze spadkiem ciśnienia i że stopień zatkania szczeliny związany jest z jej wysokością. Szczeliny o wysokości do 10 μm zostają zatkane zupełnie, a większe — częściowo, przy czym powyżej 30 μm zatkanie na skutek obliteracji jest pomijalnie małe. Poddanie elementów szczeliny lub przepływającego czynnika drganiom eliminuje zjawisko obliteracji.

Próby teoretycznego wyjaśnienia przyczyn obliteracji podjął Achmatow. W myśl jego teorii cząsteczki pochodzenia ferromagnetycznego znajdujące się wśród zanieczyszczeń w czynniku roboczym wytwarzają pewne pole sił, pod działaniem którego zostają adsorbowane cząsteczki cieczy. Zbliżając się do ścianki szczeliny zanieczyszczenie tego typu dostaje się pod działanie pola sił powierzchni ścianki, pomimo równoczesnego działania nań strumienia cieczy przylega do ścianki tworząc zarodek obliteracji. Teoria ta ma wiele słabych punktów. Nie odpowiada np. na pytanie, dlaczego grubość warstwy „zobliterowanej” przekracza znacznie zasięg działania pola sił powierzchni ścianek, dlaczego przy większym spadku ciśnienia szybkość obliteracji wzrasta znacznie, pomimo silniejszego oddziaływania strumienia cieczy na osadzające się cząstki itp.

W związku z wymienionymi trudnościami nie rozpatruje się tutaj dokładniej zjawiska obliteracji. Można przyjąć, że na niezawodność działania urządzeń hydraulicznych, w niektórych warunkach ma ona wpływ bardzo mały w porównaniu z wpływem zanieczyszczeń. Bez porównania istotniejszy jest bezpośredni wpływ zanieczyszczeń na pracę układu — przez zatykanie szczeliny, zakleszczanie współdziałających elementów ruchomych itp.

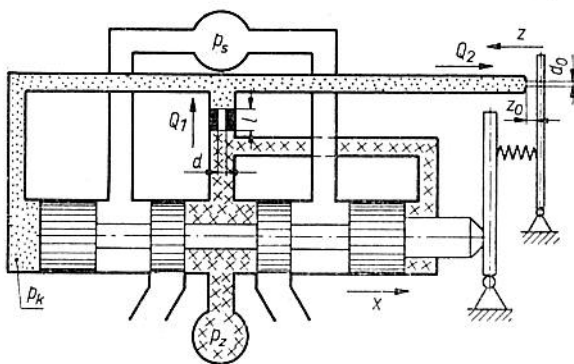
1.5.2. Wpływ zanieczyszczeń na pracę wzmacniacza hydraulicznego

Po ogólnej analizie zjawisk występujących podczas przepływu płynu roboczego przez szczeliny mikronowe można przejść do rozpatrzenia przypadku bardziej szczegółowego — *pracy wzmac-*

niacza hydraulicznego. W układzie hydraulicznym jest on elementem najczulszym, a równocześnie jednym z najbardziej odpowiedzialnych. Od poprawności jego działania zależeć będzie w dużym stopniu prawidłowość działania całego układu.

Wiele czynników wpływa zakłócająco na pracę wzmacniacza. W większości jednak przypadków zagadnienia te są opracowane teoretycznie i nie będą tutaj omawiane. Główna uwaga będzie zwrócona na te zaburzenia pracy urządzenia, których bezpośrednią lub pośrednią przyczyną są zanieczyszczenia występujące pod postacią dyspersyjnej fazy stałej w czynniku roboczym.

W czasie pracy hydraulicznych par suwakowych daje się zauważyć zjawisko występowania *progu nieczułości* rozumianego jako najmniejsza wartość sygnału wejściowego niezbędnego do zadziałania urządzenia. Okazuje się, że do przesunięcia suwaka jest konieczne podanie określonej wartości sygnału wejściowego, poniżej której układ na sygnał nie reaguje. Przy tym z obliczeń teoretycznych wynika, że wartość sygnału jest na tyle duża, że nieczułości nie można wytłumaczyć przez założenie, iż wywołana jest jedynie tarciami. Można uzasadnić teoretycznie, że wpływ taki posiadają zarówno siły wynikające z obliteracji szczeliny, jak również istnienie zanieczyszczeń w cieczy. We wzmacniaczu hydraulicznym, tak jak w każdym urządzeniu, w którym istnieją zespoły suwak-tuleja, występuje zawsze próg nieczułości, a więc obszar zmian wartości wielkości wejściowej nie powodujących zmian wartości wielkości wyjściowej. Na „szerokość” tego progu oczywiście wpływa wiele czynników. Najważniejszymi spośród nich będą zanieczyszczenia w cieczy roboczej, powodujące zakleszczenia suwaka rozrządczego oraz spadek ciśnienia zasilania poniżej wymaganej wartości. Dokładne rozpatrywanie zagadnienia



Rys. 1.39. Schemat obliczeniowy dwustopniowego wzmacniacza hydraulicznego

wpływu zanieczyszczeń na próg nieczułości wzmacniacza wykracza poza zakres tego opracowania. Przytoczone zostaną tutaj tylko pewne uwagi dotyczące tego problemu na przykładzie niesymetrycznego wzmacniacza hydraulicznego wybranego jako przykład typowej konstrukcji. Na rys. 1.39 przedstawiono schemat wzmacniacza z uwzględnieniem oznaczeń wielkości występujących w obliczeniach.

Założmy, że nastąpiło w stanie spoczynku zakleszczenie suwaka rozrządczego, na skutek istnienia zanieczyszczeń. W związku z tym próg nieczułości będzie określony przez przyrost Δp_k ciśnienia kaskodowego p_k konieczny do wywołania przesunięcia x suwaka. Ciśnienie p_k zmieniamy przez zmianę odległości z między dyszą o średnicy wylotu d_0 a przysłoną. Przysłonięcie o Δz wylotu dyszy spowoduje przyrost ciśnienia Δp_k , który określa się z porównania przyrostów natężeń przepływu ΔQ_1 i ΔQ_2

$$Q_1 = \frac{\pi d^4 (p_z - p_k)}{128 \mu l}; \quad \Delta Q_1 = \frac{\pi d^4}{128 \mu l} \quad (1.15)$$

$$\left. \begin{aligned} Q_2 &= \alpha \pi d_0 (z_0 - z) \sqrt{\frac{2g}{\gamma} p_k} \\ \Delta Q_2 &= -\alpha \pi d_0 \sqrt{\frac{2g}{\gamma} p_{k0} \Delta z} + \alpha \pi d_0 z_0 \sqrt{\frac{2g}{\gamma}} \frac{1}{2 \sqrt{p_{k0}}} \Delta p_k \end{aligned} \right\} (1.16)$$

Ponieważ

$$\Delta Q_1 = \Delta Q_2 \quad (1.17)$$

więc

$$\Delta p_k = \frac{1}{\frac{d^4}{128 \mu l \alpha d_0} \sqrt{\frac{2g}{\gamma} p_{k0}} + \frac{z_0}{2 p_{k0}}} \Delta z \quad (1.18)$$

gdzie: μ — lepkość cieczy, α — współczynnik przepływu, γ — gęstość cieczy, p_z — ciśnienie zasilania, p_k — ciśnienie kaskadowe, p_{k0} — ciśnienie kaskadowe w stanie ustalonym, d_0 — średnica dyszy sterującej, d — średnica oporu stałego kaskady, l — długość przepływowa oporu stałego kaskady, z_0 — odległość między dyszą a przysłoną w stanie ustalonym, z — odległość między dyszą a przysłoną.

Oczywiście p_{k0} jest funkcją ciśnienia p_z , bo dla $z = z_0$

$$p_{k0} = p_z + A - 0,5 \sqrt{4A p_z + A^2} \quad (1.19)$$

przy czym

$$A = \frac{(128 \mu l \alpha d_0 z_0)^2}{d^8} \cdot \frac{2g}{\gamma} \quad (1.20)$$

Ciśnienie p_{k0} maleje ze spadkiem ciśnienia p_z . Jeżeli przed wzmacniaczem znajduje się filtr dokładnego oczyszczenia, to zależność ta będzie uwarunkowana stopniem zanieczyszczenia cieczy, co wynika z oczywistego wzrostu oporów na filtrze podczas pracy z cieczą zanieczyszczoną. Prowadzi to do zmniejszenia przyrostów ciśnienia kaskadowego wzmacniacza, odpowiadających takim samym zmianom przysłonięcia sterującego dyszy.

1.5.3. Metoda wyznaczania funkcji niezawodności urządzeń hydraulicznych

Dokładne wyznaczenie funkcji niezawodności $R(t)$ jest możliwe jedynie na podstawie doświadczeń, gdyż najdokładniejsze nawet obliczenia nie są w stanie ująć całej skali zmienności rzeczywistych warunków pracy urządzenia, podlegających zupełnie przypadkowym wpływom. Dotychczasowe rozważania dotyczyły jakościowego omówienia jedynie nielicznych spośród nich.

Przechodząc do doświadczeń wprowadza się w teorii niezawodności dodatkowo takie pojęcie jak przedział ufności

$$\text{przedział ufności} = P[R_{min}(t) < R_{max}(t)] \quad (1.21)$$

gdzie: $R_{min}(t)$ i $R_{max}(t)$ są zwykłymi zmiennymi określającymi granice przedziału ufności wyznaczonymi na podstawie danych doświadczalnych.

Równocześnie przedział ufności jest równy $1 - \alpha - \beta$, przy czym

$$\alpha = P[R(t) > R_{max}(t)] \quad (1.22)$$

$$\beta = P[R(t) \leq R_{min}(t)] \quad (1.23)$$

Jeżeli w toku przeprowadzonego doświadczenia uzyskano następujące wyniki: n uszkodzeń w czasie t , w badanych egzemplarzach, wtedy prawdopodobieństwa α i β odpowiadają wyrażeniom

$$\alpha = P[\text{więcej niż } n \text{ uszkodzeń w czasie } t \text{ przy } R(t) = r_{max}(t)] \quad (1.24)$$

$$\beta = P[n \text{ lub mniej uszkodzeń w czasie } t \text{ przy } R(t) = R_{min}(t)] \quad (1.25)$$

Poszukiwać będziemy metody wyznaczania funkcji $R_{min}(t)$ i $R_{max}(t)$ na podstawie możliwie prostych i tanich badań.

Załóżmy że badaniom podlega jeden tylko egzemplarz danego urządzenia oraz że występujące uszkodzenia są nieniszczące. Każdorazowo można więc układ doprowadzić do stanu pełnej sprawności. Zastanówmy się, jakie jest prawdopodobieństwo wystąpienia i uszkodzeń w czasie t przy funkcji niezawodności $R(t)$. Praw-

dopodobięństwo to oznaczymy $P[i, t, R(t)]$. Jeżeli rozpatrzmy zdarzenie A , złożone z dwóch zdarzeń prostych A_1 i A_2 , gdzie:

A_1 : w czasie t nastąpiło i uszkodzeń;

A_2 : w czasie t wystąpiło jeszcze jedno uszkodzenie, nieodróżnialne od pozostałych,

A : $i+1$ uszkodzenie nastąpiło w czasie t ,

to będzie oczywiste, że zdarzenie A zajdzie wówczas, gdy w dowolnym porządku zajdą zdarzenia A_1 i A_2 . Zgodnie więc z zasadami rachunku prawdopodobieństwa można napisać

$$\sum P[A_1 \cdot A_2] = (i+1)P[A] = P[A_1] \cdot P[A_2] \quad (1.26)$$

$$P[A] = \frac{P[A_1] \cdot P[A_2]}{i+1} \quad (1.27)$$

Ponieważ zgodnie z poprzednimi założeniami

$$\begin{aligned} P[A] &= P[i+1, t, R(t)] \\ P[A_1] &= P[i, t, R(t)] \end{aligned} \quad (1.28)$$

$$P[A_2] = \int_0^t \lambda(t) dt$$

więc równanie (1.27) przybierze postać

$$P[i+1, t, R(t)] = P[i, t, R(t)] \frac{\int_0^t \lambda(t) dt}{i+1} \quad (1.29)$$

Jeżeli w równaniu (1.29) podstawimy i zamiast $i+1$ oraz $i-1$ w miejsce i , to otrzymamy

$$P[i, t, R(t)] = P[i-1, t, R(t)] \frac{\int_0^t \lambda(t) dt}{i} \quad (1.30)$$

Podstawiając (1.30) do (1.29), otrzymamy

$$P[i+1, t, R(t)] = P[i-1, t, R(t)] \frac{\left[\int_0^t \lambda(t) dt \right]^2}{i(i+1)} \quad (1.31)$$

Po i podstawieniach tego typu otrzymamy

$$P[i, t, R(t)] = P[0, t, R(t)] \frac{\left[\int_0^t \lambda(t) dt \right]^i}{i!} \quad (1.32)$$

i ostatecznie po uwzględnieniu, że zgodnie z definicją funkcji niezawodności $P[0, t, R(t)] = R(t)$

$$P[i, t, R(t) = R(t)] = \frac{\left[\int_0^t \lambda(t) dt \right]^i}{i!} = R(t) \frac{\{-\ln [R(t)]\}^i}{i!} \quad (1.33)$$

Ponieważ zgodnie z definicją funkcja

$$\alpha = P[R(t) > R_{max}(t)] \quad (1.34)$$

co można zapisać inaczej jako

$$\alpha = P[\text{więcej niż } n \text{ uszkodzeń w czasie } t \text{ przy } r_{max}(t)] \quad (1.35)$$

$$\alpha = P[E] \quad (1.36)$$

gdzie: E — zdarzenie złożone z sumy zdarzeń prostych: E_1, E_2, \dots , przy czym E_1 — zajście $n+1$ uszkodzeń w czasie t , E_2 — zajście $n+2$ uszkodzeń w czasie t itp.

W związku z tym

$$\alpha = P[E] = P[E_1 + E_2 + \dots] = P[E_1] + P[E_2] + \dots \quad (1.37)$$

i ostatecznie można napisać

$$\begin{aligned} \alpha &= \sum_{i=n+1}^{\infty} P[i, t, R_{max}(t)] = 1 - \sum_{i=0}^n P[i, t, R_{max}(t)] = \\ &= 1 - \sum_{i=0}^n R_{max}(t) \frac{\{-\ln [R_{max}(t)]\}^i}{i!} \end{aligned} \quad (1.38)$$

W analogiczny sposób dowodzi się prawidłowości zależności

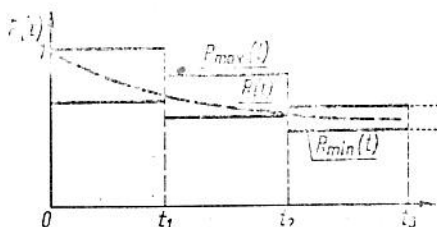
$$\begin{aligned} \beta &= P[R(t) < R_{min}(t)] = \\ &= P[n \text{ lub mniej uszkodzeń w czasie } t \text{ przy } R_{min}(t)] = \\ &= \sum_{i=0}^n P[i, t, R_{min}(t)] = \sum_{i=0}^n R_{min}(t) \frac{\{-\ln R_{min}(t)\}^i}{i!} \end{aligned} \quad (1.39)$$

Wzory (1.38) i (1.39) przedstawić można razem, jako

$$k = A \sum_{i=0}^n \frac{[-\ln A]^i}{i!} \quad (1.40)$$

Ze wzoru tego wyznaczmy $A(\beta) = R_{min}(t)$ dla $K = \beta$ oraz $A(1-\alpha) = R_{max}(t)$ dla $k = 1-\alpha$.

Wzór (1.40) umożliwia zbudowanie za pomocą maszyny matematycznej tablic wartości dla różnych liczb uszkodzeń n . Za pomocą takich tablic, po doświadczalnym określeniu liczby uszkodzeń w określonych przedziałach czasu, można wyznaczyć przedziały ufności. Wyniki można przedstawić graficznie jak pokazano przykładowo na rys. 1.40.



Rys. 1.40. Sposób graficzny określenia funkcji niezawodności

Funkcję niezawodności wyznaczamy pośrednio, dobierając jakąś funkcję odpowiadającą znalezionym przedziałom ufności we wszystkich odcinkach czasu, na jakie podzielono czas pomiaru. Bez przeprowadzenia odpowiednich pomiarów trudno zaproponować którąś z możliwych postaci funkcji. Wydaje się jednak, że najodpowiedniejszymi są funkcje przedstawione poniżej:

1) model dla zwykłych uszkodzeń

$$\lambda(t) = k, R(t) = e^{-kt}, F(t) = -\frac{dR(t)}{dt} = ke^{-kt} \quad (1.41)$$

gdzie $F(t)$ — funkcja rozkładu uszkodzeń w czasie;

2) model Weibulla

$$\left. \begin{aligned} R(t) &= e^{-k(t-m)^\eta}, \lambda(t) = k\eta(t-m)^{\eta-1} \\ F(t) &= k\eta(t-m)^{\eta-1} e^{-k(t-m)^\eta} \text{ (dla } t > m) \end{aligned} \right\} \quad (1.42)$$

3) rozkład gamma uszkodzeń w czasie

$$\left. \begin{aligned} F(t) &= \frac{e^{-t/\beta} t^\alpha}{\Gamma(\alpha+1) \beta^{\alpha+1}}, \quad R(t) = \frac{\int_0^t e^{-t/\beta} \left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha \frac{1}{\beta} dt}{\Gamma(\alpha+1)} \\ \lambda(t) &= \frac{e^{-t/\beta} t^\alpha}{\int_0^t e^{-t/\beta} t^\alpha dt} \end{aligned} \right\} \quad (1.43)$$

4) rozkład Gaussa

$$\left. \begin{aligned} F(t) &= \frac{e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi} \sigma}, & R(t) &= \operatorname{erfc}(t-m) \\ \lambda(t) &= \frac{e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi} \sigma \operatorname{erfc}(t-m)} \end{aligned} \right\} \quad (1.44)$$

przy czym

$$\operatorname{erfc} = \int_x^\infty \frac{e^{-x^2} dx}{\sqrt{2\pi}} \quad (1.45)$$

5) rozkład logarytmno-normalny

$$\left. \begin{aligned} F(t) &= \frac{e^{-\frac{\ln(t)-\ln(m)}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi} \sigma t}, & R(t) &= \operatorname{erfc}[\ln(t) - \ln(m)] \\ \lambda(t) &= \frac{e^{-\frac{[\ln(t)-\ln(m)]^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi} \sigma t \operatorname{erfc}[\ln(t) - \ln(m)]} \end{aligned} \right\} \quad (1.46)$$

Przedstawiona metoda oceny funkcji niezawodności jest szybka i prosta, a w połączeniu ze wzorami ogólnymi wyrażającymi funkcję niezawodności

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (1.47)$$

funkcję intensywności uszkodzeń

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (f(t) \text{ — funkcja gęstości trwałości}) \quad (1.48)$$

oraz funkcję trwałości przeciętnej

$$E(T) = \int_0^\infty R(t) dt \quad (1.49)$$

umożliwia wyciągnięcie wielu istotnych wniosków dotyczących urządzenia prototypowego znajdującego się już na etapie prób.

Doświadczalne określenie wpływu zanieczyszczeń występujących w cieczy roboczej na niezawodność działania jest proste pod warunkiem użycia wzmacniacza hydraulicznego jako czujnika pomiarowego oraz urządzeń do pomiaru koncentracji i rozkładu wymiarowego zanieczyszczeń.

Pomiary powinny przebiegać następująco:

1) na podstawie znanych wymagań stawianych danemu urządzeniu w układzie obliczamy wartość maksymalną proggu nieczułości Δz_{max} ; każde przekroczenie tej wartości w czasie pracy układu będziemy uważać za uszkodzenie;

2) zasilamy układ cieczą roboczą o znanej koncentracji i gęstości rozkładu wymiarowego zanieczyszczeń i podajemy sygnał sterujący na wejście wzmacniacza, każdorazowo mierząc tę jego wartość, przy której następuje uruchomienie suwaka rozrządczego; za pomocą wyżej opisanej metody wyznaczamy funkcję niezawodności urządzenia przy danym stopniu zanieczyszczeń czynnika roboczego;

3) znając funkcję niezawodności $R(t)$, obliczamy za pomocą wzoru (1.49) trwałość przeciętną $E(t)$ urządzenia;

4) pomiary powtarzamy dla różnych stopni zanieczyszczenia czynnika roboczego, przyjmując trwałość przeciętną za wskaźnik wpływu zanieczyszczeń na niezawodność działania urządzenia hydraulicznego.

Określenie koncentracji zanieczyszczeń za pomocą wzmacniacza hydraulicznego jest możliwe także w przypadku jego wywzorcowania, polegającego na zdjęciu charakterystyki: próg nieczułości (maksymalna histereza w strefie nieczułości) — koncentracja zanieczyszczeń w cieczy. Zależność ta będzie podstawą do określenia koncentracji zanieczyszczeń w badanej cieczy roboczej, dla której określa się wartość proggu nieczułości przy włączonym wzmacniaczu. W analogiczny sposób można określić charakterystykę odfiltrowania filtrów, gdy do czynnika roboczego będziemy wprowadzać zanieczyszczenia o różnej koncentracji. Badając próg nieczułości wzmacniacza przy zasilaniu go zanieczyszczoną cieczą przed i po przejściu przez filtr badany, obliczymy w łatwy sposób kolejne wartości charakterystyki odfiltrowania.

Rozdział 2. POROWATE MATERIAŁY FILTRACYJNE

2.1. Zastosowania materiałów filtracyjnych o dużej porowatości

Materiałami filtracyjnymi o dużej porowatości będziemy nazywali takie materiały, których porowatość umownie jest większa niż 10%. Specyfika takich materiałów porowatych polega na wykorzystaniu elementów wyjściowych o dowolnym kształcie, zapewniających uzyskanie porów o wymiarach najczęściej w zakresie od 0,0001 do 1,5 mm. Materiały porowate otrzymuje się z tworzyw sztucznych, metali lub stopów.

Materiały filtracyjne o dużej porowatości charakteryzują się następującymi parametrami:

- porowatością, czyli stosunkiem objętości porów czynnych (efektywnych) materiału do objętości całkowitej wyrobu;
- natężeniem przepływu płynu o danej lepkości, przy danym spadku ciśnienia, przypadającym na jednostkę powierzchni i grubości materiału porowatego;
- funkcją gęstości prawdopodobieństwa rozkładu ilości porów;
- parametrami mechanicznymi, geometrycznymi i fizykochemicznymi, które w określonym typie zastosowań mają istotne lub decydujące znaczenie z punktu widzenia przeznaczenia wyrobu.

Ze względu na szybki rozwój technologii, ilość i asortyment wyrobów porowatych uzyskanych przy zastosowaniu różnych metod gwałtownie wzrasta. W tej liczbie również wzrasta ilość i asortyment produkowanych wyrobów o dużej porowatości. Znalazły one różnorodne zastosowania. Można tutaj wymienić przykładowo zastosowania w budowie maszyn i przyrządów pomiarowych, w przemyśle lotniczym, obrabiarkowym, elektrotechnicznym, chemicznym, spożywczym, farmaceutycznym, metalurgicznym, w energetyce atomowej, budowie raket itp.

Nie wnikając w istotę technologii materiałów o dużej poro-

watości, wyszczególnimy niektóre cechy tych materiałów, które mogą być stosunkowo łatwo uzyskane przy zastosowaniu odpowiedniego składu chemicznego i odpowiednich wymiarów elementów wyjściowych. Możliwe jest uzyskanie materiałów o kontrolowanej porowatości dochodzącej nawet do 95% i kontrolowanych wymiarach porów w granicach poniżej 0,2 μm . Na przykład w przypadku spieków granulkowych w miarę wzrostu liczby granulek w jednostkowej objętości można uzyskać zwiększenie powierzchni wewnętrznej porów w bardzo szerokich granicach. Przyjmując objętość 1 cm^3 materiału za wyjściową do obliczeń i kształt cząstki w postaci sześciangu otrzymamy przy długości boku cząstki 10^{-4} cm, 10^{12} cząstek w 1 cm^3 o całkowitej powierzchni wynoszącej 6 m^2 . W praktyce np. w przypadku filtrów o porowatości 40%, wymiarach porów 10^{-4} cm, powierzchni filtrów 10 cm^2 i długości porów 0,5 cm, wewnętrzna powierzchnia porów cylindrycznych wynosi ok. 8 m^2 . Na podstawie przytoczonych danych można wysunąć wnioski dotyczące olbrzymich możliwości praktycznego wykorzystania materiałów porowatych w różnych dziedzinach techniki i technologii.

Jako główne kierunki zastosowań materiałów porowatych należy wymienić te, w których wykorzystuje się: dużą powierzchnię wewnętrzną (filtrowanie, wymienniki ciepła, oddziaływanie katalityczne), małe wymiary porów i rozkład wymiarowy porów (filtrowanie, tłumienie drgań prędkości i natężenia przepływu płynów) oraz wytrzymałość mechaniczną, termiczną i odporność chemiczną.

Rozważymy na początku kilka przypadków zastosowań materiałów o dużej porowatości w różnych dziedzinach techniki, scharakteryzujemy istotne cechy postępu w dziedzinie zastosowań materiałów stosowanych do filtrowania płynów, a następnie omówimy najbardziej rozpowszechnione materiały porowate, przyjmując za kryterium podziału budowę wewnętrzną i skład chemiczny.

Materiały porowate znalazły zastosowanie w budowie takich urządzeń, w których dotychczasowe wykorzystanie innych materiałów nie zapewniało uzyskania optymalnych efektów w zakresie sprawności i niezawodności. Elementy o dużej porowatości ze względu na niespotykane własności w porównaniu z materiałami o bardzo małej porowatości lub o całkowicie zwartej strukturze, ułatwiają budowę i eksploatację różnych urządzeń nawet w bardzo ciężkich warunkach, m. in. w elementach paliwowych.

Na przykład element paliwowy z zastosowaniem porowatego niklu umożliwia uzyskanie wysokich gęstości prądu rzędu 0,8 A/ cm^2 powierzchni elektrod.

Materiały elektrod nie powinny korodować przy wysokich temperaturach oraz nie powinny tworzyć warstw zmniejszających

intensywność reakcji. Stosowane są w różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych spiekane proszki metali oraz ich tlenków. Do najczęściej stosowanych należą: NiO, Cu₂O, Pt, Fe, Ni, Co, Cu, Cr, Mn, Ag.

Jednym z podstawowych wymagań dla tego typu elementów jest uzyskanie porów o małym rozrzucie wymiarów. Uzyskuje się to albo przez zawężenie frakcji proszku wyjściowego i stosowanie kulistych kształtów ziarn, albo przez selekcjonowanie proszku o średnicach w zakresie 5 do 10 μm i prasowanie z wypełniaczami (np. metalowymi), a następnie obróbkę chemiczną oraz spiekanie.

Zastosowanie materiałów porowatych w budowie filtrów rozwinęło się w związku z rozwojem płynowych urządzeń wysokociśnieniowych i coraz częstszym stosowaniem w skali przemysłowej procesów chemicznych, w których jest konieczne oczyszczanie aktywnych chemicznie substancji. Ze względu na wiele niezależnych zalet filtrowania za pomocą materiałów porowatych w porównaniu z innymi metodami filtrowania cieczy i gazów, asortyment i ilość produkowanych obecnie materiałów porowatych do oczyszczania płynów jest wyjątkowo duży. Materiały porowate są stosowane zarówno jako małe filtry o powierzchni ok. 1 cm² oraz jako zestawy filtracyjne o powierzchni kilkudziesięciu m². Najbardziej rozpowszechnionymi materiałami stosowanymi na wkłady filtracyjne są: brąz, żelazo, stале nierdzewne, tworzywa sztuczne, papier itp. Na przykład filtry cieczy i gazów z wykorzystaniem wkładów ze spieków metalowych stosuje się do oczyszczania powietrza w zakładowych stacjach zasilania, przed precyzyjnymi zespołami pneumatycznych przyrządów pomiarowych i automatyki, do oczyszczania powietrza z zanieczyszczeń radioaktywnych, do oczyszczania nafty, benzyny i olejów w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym i chemicznym. Szczególne znaczenie ze względu na dużą wytrzymałość mechaniczną i termiczną oraz łatwość uzyskania określonych wymiarów porów ma stosowanie spieków metalowych jako filtrów w urządzeniach hydraulicznych sterujących i wykonawczych, w przemyśle wydobywania nafty, energetyce atomowej oraz w urządzeniach płynowych rakiet i różnych zastosowaniach wojskowych. Coraz częściej stosuje się metalowe filtry spiekane w hydraulicznych i pneumatycznych urządzeniach obrabiarek, w automatyce wydobywania węgla, maszynach budowlanych, drogowych itd.

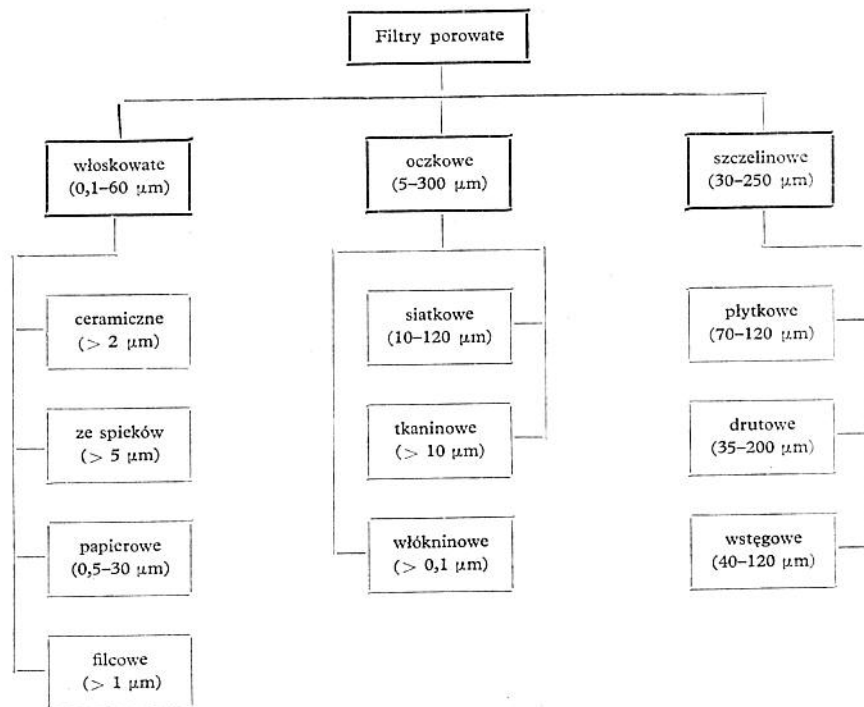
Filtry porowate znalazły w szerokim zakresie zastosowanie w filtrowaniu płynów aktywnych chemicznie. Stosowane są siatki i spieki z niklu, np. do filtrowania jodku sodowego, oraz filtry ze stali nierdzewnej do filtrowania HNO₂, H₂SO₃, HPO₂, HCl i in-

nych. W ostatnich latach wzrosła znacznie produkcja filtrów z tytanu do zastosowań chemicznych.

Produkowane filtry ze stali nierdzewnej przeznaczone do pracy w ośrodkach silnie agresywnych chemicznie zawierają najczęściej: 18% Cr i 8% Ni; 18% Cr i 12% Ni; 20% Cr i 18% Ni; 4% Cu i 3% Mo, a pozostała część — żelazo.

Filtry ze stali nierdzewnych są produkowane w zakresie grubości od 0,5 do 5 mm (siatki i spieki), o wymiarach porów ok. 0,2 do 25 μm i porowatości 18 do 85%. Czas pracy takich filtrów wg danych niektórych firm USA wynosi w przypadku 10 do 70% HNO_3 — 20 do 30 lat, 10 do 85% HPO_3 — 0,5 do 20 lat, 10% NaOH — ok. 10 lat, 10 do 96% H_2SO_4 — 1 do 15 miesięcy, 1 do 37% HCl — 5 do 500 godzin.

Filtry porowate stosuje się również do oczyszczania rtęci. Ponadto w przemyśle spożywczym i farmaceutycznym są stosowane filtry wykonane z proszków srebra o wymiarach ziarn 0,008 do 0,012 mm, jako filtry bakteriologiczne.



Rys. 2.1. Podział materiałów filtracyjnych stosowanych w budowie filtrów porowatych z wyszczególnieniem najczęściej spotykanych nominalnych dokładności oczyszczania

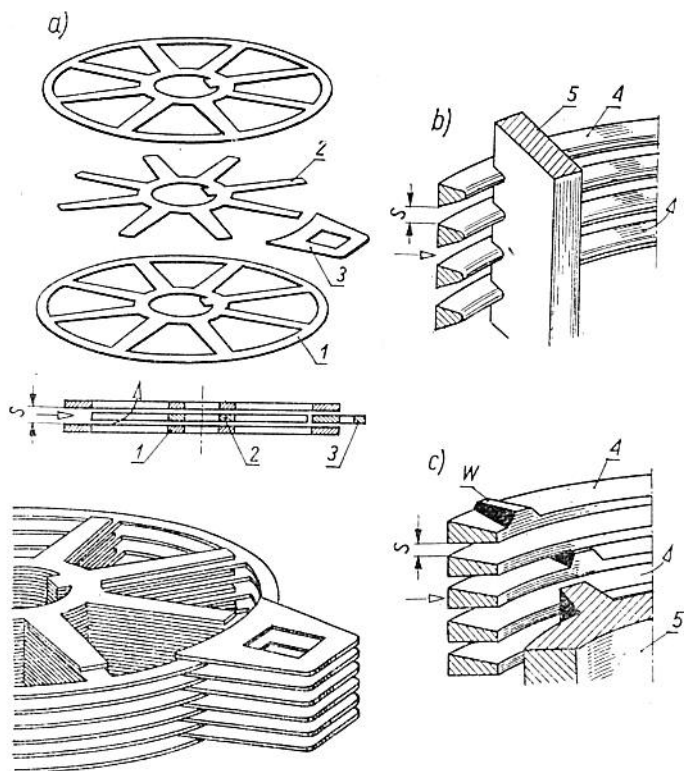
We wszystkich wymienionych zastosowaniach materiałów porowatych zasadnicze znaczenie mają: własności przepływowe i filtracyjne, małe wymiary porów, duża powierzchnia wewnętrzna porów, siły kapilarne w porach, duża porowatość, skład chemiczny materiału, odporność na działania chemiczne i cieplne oraz obciążenia mechaniczne, dobre własności plastyczne, łatwość kształtowania i obróbki. Zajmiemy się teraz szczegółowym omówieniem różnych materiałów porowatych przeznaczonych głównie do filtrowania płynów roboczych oraz określimy cechy charakterystyczne wykorzystania takich materiałów w budowie filtrów.

Na rys. 2.1 przytoczono klasyfikację porowatych materiałów filtracyjnych stosowanych w budowie filtrów cieczy i gazów, z wyszczególnieniem występujących najczęściej nominalnych dokładności oczyszczania płynów.

2.2. Materiały filtracyjne szczelinowe

Porowate materiały filtracyjne szczelinowe charakteryzują się specyficzną budową porów. Pory są najczęściej utworzone przez składanie cienkich płytek o specjalnej budowie, nawijanie drutu o przekroju okrągłym lub profilowanym bądź też przez składanie lub nawijanie wstęg o różnej konfiguracji. Na rys. 2.2 pokazano trzy najczęściej występujące odmiany konstrukcyjne wkładów filtracyjnych szczelinowych, na rys. 2.3 przedstawiono natomiast przykłady realizacji wkładów filtracyjnych wstęgowych lub drutowych, w których szczelinowy por filtracyjny jest utworzony z odpowiednio wygiętego lub walcowanego elementu nawojowego.

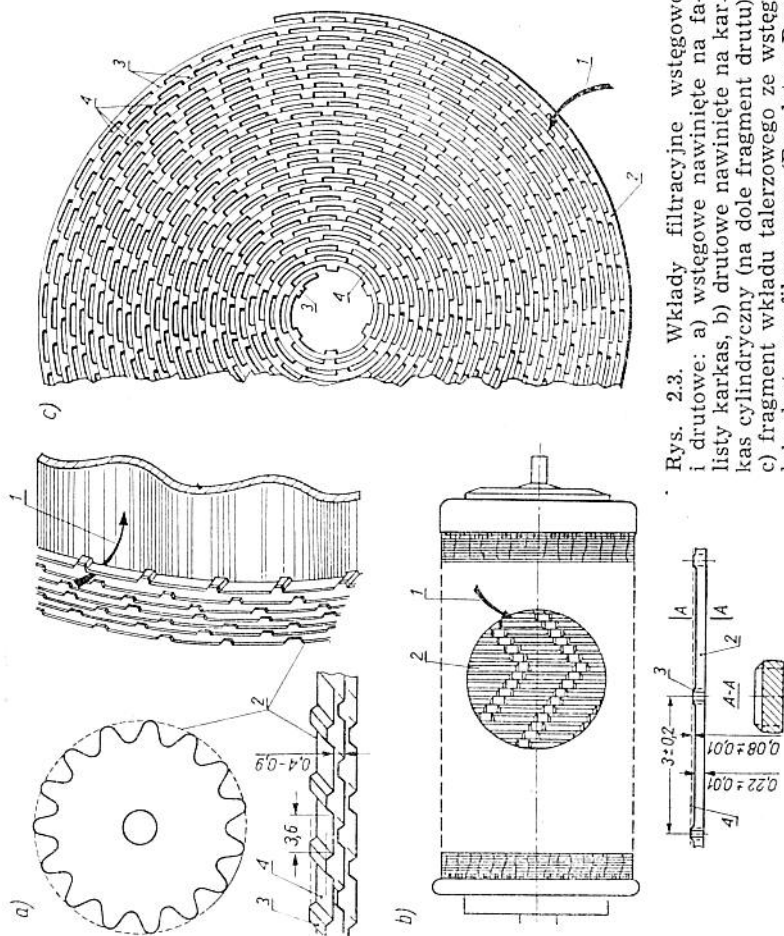
Szczeliny lub szczelinowe krawędzie filtracyjne są wytworzone w postaci płytek, walców, stożków, pierścieni itp. Największe rozpowszechnienie zyskały rozwiązania pokazane na rys. 2.4. Na rys. 2.4a przedstawiono element w postaci podkładki z wycięciami, w których przekrój przepływowy jest zbliżony do trójkąta. Wycięcia po obu stronach mają różne kierunki przepływowe i przez nałożenie stosu podkładek filtracyjnych umożliwiają zachowanie jednakowych wymiarów szczelin. Filtry takie są budowane z metalu lub tworzyw sztucznych. Wzdłużny filtr szczelinowy przedstawiony na rys. 2.4 ma wycięcia wzdłuż walca na przemian do wpływu i wypływu płynu. Z lewej strony pokazano zastosowanie takiego wkładu filtracyjnego przed dyszą wtryskową. Na rys. 2.4 pokazano wkład filtracyjny, podobnej jak poprzednio budowy, umożliwiający nastawienie wysokości szczeliny filtracyjnej dzięki lekko stożkowatemu rdzeniu, na którym są nacięte szczeliny wzdłużne. Dwuszczelinowy element filtracyjny utworzony z pły-



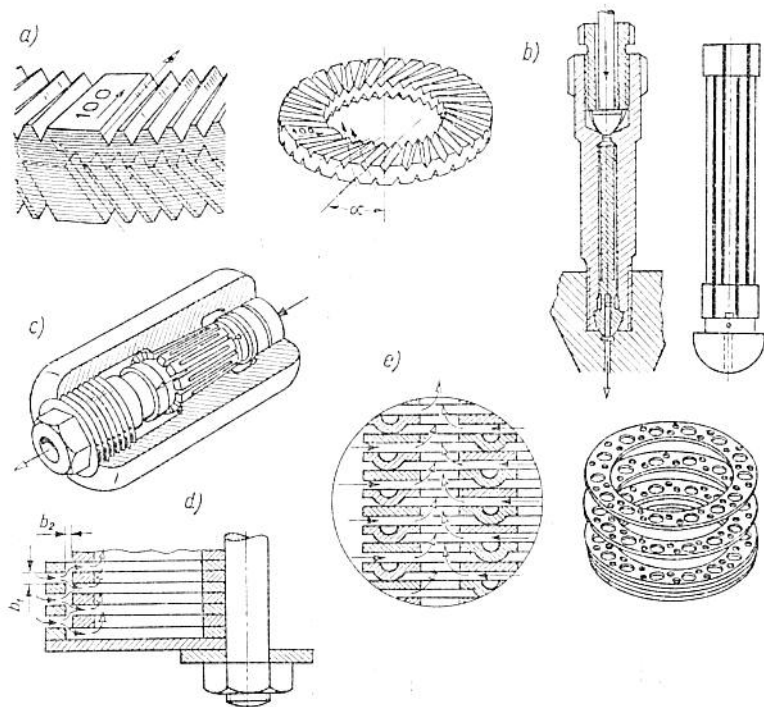
Rys. 2.2. Schemat budowy wkładu filtracyjnego szczelinowego: a) płytkowego, b) drutowego, c) wstęgowego; 1 — płytka filtracyjna, 2 — płytka odległościowa, 3 — złącznik, 4 — element profilowany, 5 — ruszt, s — wymiar najmniejszy szczeliny, w — występ dystansujący szczelinę

tek składanych o dwu różnych średnicach zewnętrznych przedstawiono na rys. 2.4. Wstępną szczelinę filtracyjną tworzą rozstawione płytki (wysokość szczeliny wynika z grubości płytek), a drugą szczelinę tworzą krawędzie (wysokość szczeliny wynika z różnicy średnic i wycięć w płytkach). Duże rozpowszechnienie znalazły filtry szczelinowe typu pierścieniowego pokazane na rys. 2.4. Pierścienie są budowane w ten sposób, że mają otwory do wypływu cieczy, która wpływa z przestrzeni zewnętrznej i wewnętrznej pierścienia. Szczelinę filtracyjną tworzą wgłębienia w materiale pierścienia bądź wżery na materiale pierścienia wykonane np. metodą elektrolityczną.

Ponadto do najczęściej spotykanych rozwiązań konstrukcyjnych filtrów szczelinowych, oprócz wymienionych filtrów płytkowych, należą filtry z płytek papierowych, w których wymiar



Rys. 2.3. Wkłady filtracyjne wstępne i drotowe: a) wstępowe nawinięte na fa-listy karikas, b) drotowe nawinięte na karikas cylindryczny (na dole fragment drutu), c) fragment wkładu talerzowego ze wstęgi lub drutu profilowanego (Purolator Products Inc.); 1 — kierunek przepływu płynu, 2 — element tworzący szczelinę, 3 — element odległościowy, 4 — przesterżen-pływowa poru szczelinowego



Rys. 2.4. Szczelinowe elementy filtracyjne: a) typu podkładowego (Fipoca), b) typu szczelinowego wzdłużnego i zastosowanie w filtrze dyszy wtryskowej, c) z regulacją wymiaru szczeliny wzdłużnej (Pressure Controllers Ltd), d) dwuszczelinowe, e) typu pierścieniowego

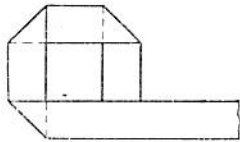
szczeliny filtrującej zależy od siły docisku płytek lub wysokości zmarszczeń na papierze, oraz filtry, w których wkłady są wykonane z folii metalowej lub tworzywa syntetycznego. Ostatni typ filtru jest szczególnie interesujący ze względu na zastosowanie taniej folii metalowej grubości rzędu $8\text{--}20\ \mu\text{m}$.

W celu utworzenia szczeliny o wymaganej wysokości między poszczególnymi płytkami lub paskami folii stosuje się poniższe trzy rozwiązania wkładów:

Wkłady szczelinowe składane z pasków folii. Na rys. 2.5 pokazano jedną z możliwych kombinacji układania pasków. Wadą tego rozwiązania jest brak występow (punktów podparcia) na stosunkowo dużej powierzchni, a więc istnieje możliwość odkształcenia swobodnego odcinka folii i zmiany wysokości szczeliny. Ponadto, powierzchnia filtrowania jest niewielka.

Wkłady z karbowanej taśmy foliowej układanej spiralnie. Rozwiązanie konstrukcyjne przedstawiono na rys. 2.6. Zaletą tego rozwiązania jest duża wytrzymałość na ściskanie, długi okres eksploatacji i łatwość regeneracji. Wadą są trudności w złożeniu taśm oraz zmienna dokładność filtrowania.

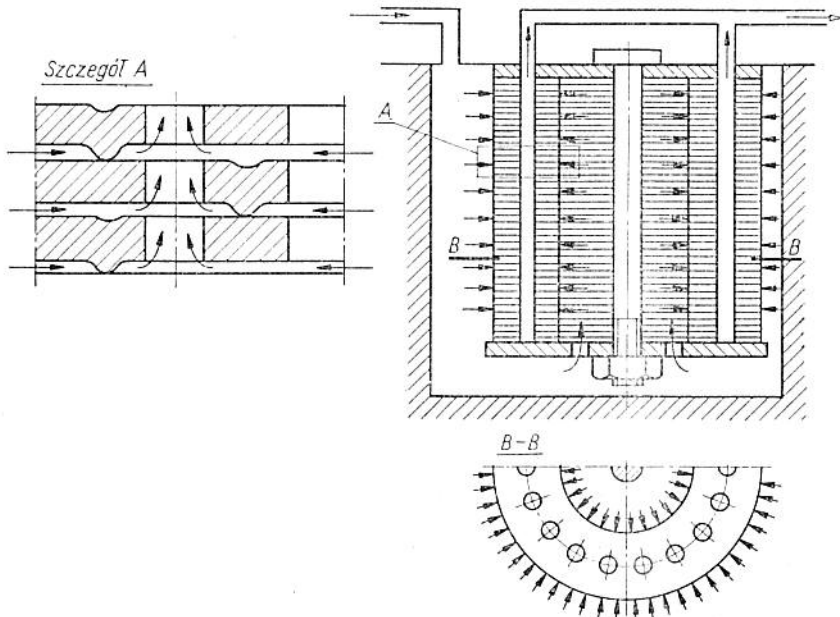
Wkłady foliowe płytkowe z występami. Przykład rozwiązania przytoczono na rys. 2.7. Występ na płytkach wykonuje się przez



Rys. 2.5. Składanie wkładu szczelnego z paszków folii



Rys. 2.6. Wkład z karbowanej taśmy foliowej



Rys. 2.7. Wkład foliowy płytkowy

radełkowanie lub wyciskanie, przy użyciu gumowych matryc. Jest to operacja prosta technologicznie i eliminuje wady rozwiązań poprzednich.

W filtrach foliowych ważnym zagadnieniem jest obliczenie ilości występów odległościowych z warunków wytrzymałościowych segmentu. W obliczeniach wytrzymałościowych rozpatruje się siły ściskające wkład filtrujący, złożony z płytek foliowych. Ciśnienie cieczy przepływającej między płytkami nie powinno spowodować odkształcenia płytek i występów odległościowych oraz zmiany wysokości szczeliny.

a) Obliczanie maksymalnej siły statycznej rozpychającej pierścienie, pochodzącej od ciśnienia przepływającej cieczy. Do obliczeń przyjęto pierścień o promieniu zewnętrznym r_2 , wewnętrznym r_1 i grubości s . Ciśnienie działające na pierścień oblicza się ze wzoru

$$p = \frac{-6\mu Q}{\pi s^3} \ln r + C_1 \quad (2.1)$$

gdzie: Q — natężenie przepływu cieczy, μ — współczynnik lepkości dynamicznej cieczy, s — grubość pierścienia, C_1 — parametr.

Parametr C_1 można obliczyć z warunków brzegowych

$$p = p_0 = 0 \quad \text{dla } r = r_1$$

$$p = p_1 \quad \text{dla } r = r_2$$

Korzystając z tych zależności, otrzymuje się

$$p = \frac{p_1}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \ln \frac{r_2}{r} \quad (2.2)$$

Mnożąc otrzymane ciśnienie z ww. równania przez elementarną powierzchnię, wyznacza się elementarną siłę rozpychającą elementarne powierzchnie płytek. Całkując zaś otrzymane wyrażenie w granicach od r_1 do r_2 , otrzymuje się wypadkową siłę P rozpychającą płytki

$$P = \int_{r_1}^{r_2} p 2\pi r dr = \pi \frac{p_1}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \left[r_2^2 - r_1^2 \left(1 + \ln \frac{r_2}{r_1} \right) \right] \quad (2.3)$$

Zakładając liniową zmianę ciśnienia, otrzymuje się znacznie prostszą postać na siłę P

$$P = \frac{3\mu Q (r_2^2 - r_1^2) \ln \frac{r_1}{r_2}}{s^3} \quad (2.4)$$

Dla następujących wartości parametrów i wymiarów segmentu $Q = 11,3 \cdot 10^{-5}$ l/min; $s = 20$ μ m; $r_1 = 6$ mm; $r_2 = 12$ mm; $\mu = 0,00292$ kG \cdot s/m², z ostatniego wzoru otrzymuje się siłę ścisającą segment $P = 0,2$ kG.

b) Obliczanie siły wynikającej z wytrzymałości pojedynczego występu pierścienia. Korzystając ze wzoru na *naprężenie maksymalne dla powłok*, mamy

$$\sigma_{max} = kR \sqrt{\left(\frac{1}{2\pi r \sin^2 \varphi}\right)^2 + \left(\frac{1}{2\pi r \sin^2 \varphi} - r \cos \varphi\right)^2} \quad (2.5)$$

gdzie: σ_{max} — dopuszczalne naprężenia w kG/cm², R — siła ścisająca w kG, r — promień kuli (przyjęto występ jako czaszę kulistą w cm, φ — kąt sferyczny czaszy kulistej (występu) w rad, k — współczynnik bezpieczeństwa.

Dzieląc siłę rozpychającą P przez siłę ścisającą R obliczoną z równania na naprężenia maksymalne dla powłok otrzymuje się niezbędną *liczbę występów n zapewniającą przeniesienie siły ścisającej* w chwili, gdy przepływ cieczy będzie wynosił zero (siły z jaką należy ścisnąć pakiet segmentów foliowych)

$$n = \frac{Pk \sqrt{\left(\frac{1}{2\pi r^2 \sin \varphi}\right)^2 + \left(\frac{1}{2\pi r^2 \sin^2 \varphi} - r \sin \varphi\right)^2}}{\delta} \quad (2.6)$$

Przy $\sigma_{max} = 5$ kG/mm², $\varphi = 60^\circ$, $k = 2$ liczba występów segmentu wynosi $n = 121$.

2.3. Papiery filtracyjne

2.3.1. Uwagi wstępne

Zagadnienie zastosowania *papierów do filtrowania* nie jest nowe. Papiery filtracyjne są od wielu dziesiątków lat stosowane w laboratoriach biologicznych i chemicznych jako *sączki*. Stąd też istnieje bardzo różnorodna ilość gatunków papierów (bibuły) przeznaczonych do tego celu. Istotny problem zastosowań papierów powstał jednak w niezbyt odległym czasie, kiedy to zaistniała potrzeba oczyszczania dużych ilości gazów i cieczy roboczych w urządzeniach przemysłowych i w płynowej technice sterowania. Okazuje się, że ze względu na masowość zastosowań filtrów dokładne-

go i bardzo dokładnego oczyszczania, wykorzystywanie filtrów metalowych staje pod znakiem zapytania głównie ze względu na ich wysoką cenę oraz na ogół niezbyt dużą trwałość. Chociaż filtry metalowe (spieki, sita filtracyjne, wkłady szczelinowe) umożliwiają stosowanie regeneracji, a więc wielokrotne użycie tego samego wkładu, to jednak trudności w organizacyjno-technicznym rozwiązaniu tego problemu są głównym czynnikiem powodującym, że zainteresowanie producentów i użytkowników urządzeń pływowych zwróciło się ku stosowaniu wkładów filtracyjnych jednorazowego użytku, tanich i jednocześnie zapewniających uzyskanie założonych charakterystyk filtracyjnych. To właśnie stanowi podstawową przyczynę coraz większego zwrócenia uwagi na opracowanie nowych materiałów filtracyjnych głównie papierowych, wełnianych i bawełnianych oraz porowatych folii filtracyjnych z tworzyw sztucznych.

Pomimo wieloletnich prac badawczych nad wyprodukowaniem tanich materiałów tkanych nie uzyskano dotychczas zadowalających wyników i dlatego dolną granicę opłacalnego, powszechnego stosowania, np. sit filtracyjnych, stanowi wymiar $40 \mu\text{m}$. Chociaż obecnie są produkowane tkane sita filtracyjne o wymiarach oczek $10 \div 20 \mu\text{m}$, a nawet poniżej tej wartości, to jednak wysoka cena oraz najczęściej konieczność prasowania i dalszej obróbki termochemicznej takich sit nie sprzyja ich stosowaniu w szerokim zakresie w większości rozwiązań przemysłowych. Z kolei tkanie sit z tworzyw sztucznych o bardzo małych wymiarach oczek jest trudne technologicznie i nie zapewnia stałości wymiarów geometrycznych, a zatem i jednoznacznych charakterystyk filtracyjnych.

Powyzsze przyczyny, a jest ich znacznie więcej, prowadzą do koncentracji badań i wysiłków technologicznych nad wyprodukowaniem materiałów włóknistych, tzn. materiałów które na skutek specjalnej obróbki mechanicznej i chemicznej odznaczają się w dużym stopniu strukturą włóknistą oraz odpowiednią odpornością mechaniczną, umożliwiającą użycie ich jako przegród filtracyjnych.

Papiery filtracyjne, które znalazły w szerokim zakresie zastosowanie w technice filtrowania mechanicznego przy użyciu materiałów włóknistych, są produkowane z włókien celulozowych (papier, bibuła, karton) i są zaliczone do grupy materiałów chłonnych (w procesie filtrowania pracują powierzchniowo i wgłębnie). Używać będziemy terminu *papier filtracyjny*, określającego wyroby włókniste o małej gęstości właściwej i dużej porowatości niezależnie od składu chemicznego włókien.

2.3.2. Podstawowe własności papierów filtracyjnych

Możemy przyjąć, że istotnymi — z punktu widzenia zastosowań papierów w budowie filtrów cieczy i gazów — są ich następujące własności:

a) geometryczne (grubość, gramatura, porowatość, wymiary porów),

b) fizykochemiczne (gęstość, zachowanie się w stosunku do cieczy i gazów: stopień pęcznienia lub kurczenia się, chłonność cieczy, odkształcalność termiczna, przewodność cieplna, temperatura palenia się itp.),

c) mechaniczne (odkształcalność mechaniczna, odporność na zerwanie, przedarcie, zginanie, łamanie rozwarstwianie, twardość),

d) filtracyjne (charakterystyka odfiltrowania dla cieczy i gazów, opory przepływu, czas filtrowania),

e) inne, wynikające ze specyfiki zastosowań.

Opracowanie metody pomiarów własności papierów filtracyjnych polega więc na określeniu warunków technicznych prób mających na celu wyznaczenie wartości parametrów badanych papierów. O ile metody badań własności zawartych w punktach a, b, c są dostatecznie jasno i dokładnie opracowane (patrz: odpowiednie normy PN, DIN, GOST, przepisy ASTM i inne) oraz opisane w wielu książkach, o tyle określenie własności filtracyjnych z punktu widzenia zastosowań papierów, szczególnie w hydraulice olejowej, nie jest praktycznie rozwiązane. Największą trudność w opracowaniu metod badania papierów przeznaczonych do filtrowania olejów stwarzają występujące duże obciążenia, zależne od lepkości cieczy i prędkości jej przepływu oraz dużych zmian lepkości cieczy z temperaturą. Oprócz tego, występowanie wielu dodatków uszlachetniających w olejach uniemożliwia dostatecznie ściśle określenie przydatności danego papieru filtracyjnego. W związku z tym również jest konieczne prowadzenie długotrwałych badań różnych gatunków olejów stosowanych jako ciecze robocze. Inną przyczyną wymagającą prowadzenia badań własności filtracyjnych papierów przeznaczonych do stosowania w urządzeniach hydraulicznych jest na ogół brak gwarancji ze strony producentów na pozytywny skutek użycia ich wyrobów, co jest spowodowane m. in. wielu przyczynami obiektywnymi (np. ze względu na stosowany proces technologiczny papieru: zawartość i skład chemiczny składników niewłóknistych, ilość i rodzaje wypełniaczy i stopień zaklejenia włókien, obecność barwników, itp.). Ponadto, ze względu na stosunkowo niską wytrzymałość mechaniczną papierów należy stosować odpowiedni sposób formowania wkładów filtrów, niskie spadki ciśnień na wkładzie filtracyjnym,

podpory w postaci sit metalowych, wąski zakres zmian temperatury pracy itd.

W Polsce, pomimo wykonania licznych prac badawczych, związanych z badaniami papierów krajowych, przeprowadzonych przez Centralny Ośrodek Konstrukcyjno-Badawczy Przemysłu Motoryzacyjnego, nie ustalono ostatecznie jakie papiery filtracyjne należy stosować do filtrowania cieczy roboczych w układach hydrauliki siłowej. Ponadto, ze względu na odmienną metodykę badań filtrów w przemyśle motoryzacyjnym niż wypracowane metody badań filtrów przez konstruktorów i producentów hydrauliki siłowej, istnieje pewna trudność w przetransponowaniu uzyskanych wyników do praktyki w obu dziedzinach zastosowań.

2.3.3. Metodyka badań papierów filtracyjnych

Przyjmując, że papiery filtracyjne przeznaczone do badań spełniają podstawowe wymagania ogólne stawiane materiałom filtracyjnym, przede wszystkim pod względem własności geometrycznych, fizykochemicznych i mechanicznych, należy skoncentrować uwagę na określeniu własności filtracyjnych. Opisane tutaj badania dotyczą głównie parametrów przepływowych i filtracyjnych.

a) *Parametry przepływowe.* Badania parametrów przepływowych powinny obejmować określenie zmian natężenia przepływu w funkcji spadku ciśnienia dla różnych płynów i różnych lepkości tych płynów. Stoisko badawcze powinno być wyposażone w źródło zasilania (generator ciśnienia lub przepływu), filtry bardzo dokładnego oczyszczania, urządzenia nastawiania ciśnienia, natężenia przepływu i temperatury, urządzenia stabilizacji tych parametrów, przyrządy pomiaru temperatury, ciśnienia (różnicy ciśnień), natężenia przepływu, oprawkę zamocowującą badany filtr lub próbkę materiału filtracyjnego. Ze względu na to, że układ i wyposażenie takiego stoiska pomiarowego oraz konieczny zestaw aparatury pomiarowej są na ogół dobrze znane, nie wydaje się konieczne przytaczanie dodatkowych informacji na ten temat.

b) *Parametry filtracyjne.* W zakresie badań papierów filtracyjnych jest wskazane zastosowanie następujących metod badawczych w celu określenia dokładności absolutnej i nominalnej:

— *metoda podstawowa* polegająca na badaniu efektywności odfiltrowania z dwu przepływów (patrz rozdz. 5 niniejszej pracy),

— *metoda testowa*, z wprowadzeniem zanieczyszczeń do płynu filtrowanego, polegająca na liczeniu cząstek zanieczyszczeń przed i za filtrem, określeniem ich wymiarów i wyznaczaniu punk-

tów charakterystyki odfiltrowania zgodnie z równaniem definicyjnym. Wybór sposobu liczenia cząstek zanieczyszczeń zależy od dysponowanego zaplecza laboratoryjnego (opis metod pomiaru jest zawarty w rozdz. 5),

— *metoda z zastosowaniem kolmatomierzy laboratoryjnych*, polegająca na określeniu względnego spadku ciśnienia (lub przepływu) płynu w czasie przed i za badanym materiałem filtracyjnym, lub *metoda kolmatomierzy eksploatacyjnych*, działających automatycznie.

Zastosowanie każdej z tych trzech metod do wyznaczenia punktów charakterystyki odfiltrowania jest uzasadnione. Metoda podstawowa, ze względu na prostotę i wysoką dokładność oraz nieniszczący charakter badań, powinna posłużyć do określenia parametrów niezbędnych szczególnie w kontroli produkcji filtrów.

Metoda testowa, jako najbardziej „intuicyjnie obiektywna” dostarcza informacji o rzeczywiście występujących cząstkach zanieczyszczeń za filtrem w związku z tym może być podstawą do obliczeń konstrukcyjnych elementów urządzenia plynowego. Niemniej jednak, nie może ona dostarczyć na tyle obiektywnych informacji, aby obliczenia można było przeprowadzić z dużą pewnością. Spowodowane to jest następującymi przyczynami. Po pierwsze, przy zastosowaniu sztucznych zanieczyszczeń o kształcie np. kulistym, uzyskane informacje będą z błędem wynikającym z przyjęcia uproszczonego modelu fizycznego zanieczyszczeń rzeczywistych. Po drugie, stosowanie zanieczyszczeń o innym kształcie niż kulistym wymaga określenia zastępczego wymiaru cząstki zanieczyszczenia, a zatem uzyskany wynik będzie z błędem wynikającym z przyjęcia uproszczonego modelu pomiarowego zanieczyszczeń.

Metoda z zastosowaniem kolmatomierzy nie ma tych wad, ponieważ wynik badań jest określony na podstawie efektu działania zanieczyszczeń na szczelinę, wyrażonego w postaci zmian parametrów hydrodynamicznych. W przypadku zastosowania np. cieczy z zanieczyszczeniami rzeczywistymi, nie jest tu istotny wymiar zanieczyszczenia (określa go wymiar szczeliny), lecz jego występowanie powodujące określony skutek działaniowy przyrządu w warunkach zbliżonych do warunków pracy typowych węzłów urządzeń hydraulicznych narażonych na szkodliwy wpływ zanieczyszczeń.

W ocenie porównawczej różnych materiałów filtracyjnych wystarczy stosować tylko jedną z ww. metod badań.

c) Sposób przedstawiania wyników badań. W zakresie parametrów przepływowych najwygodniejsze jest przedstawienie wyników w postaci wykresów (lub tabeli) zależności $q = f(p_f, \eta)$ (q —

jednostka objętości lub masy płynu odniesiona do jednostki czasu i jednostki powierzchni materiału filtracyjnego, p_f — różnica ciśnień między stroną wejściową a wyjściową materiału filtracyjnego, η — lepkość płynu).

Uzyskany w ten sposób pęk charakterystyk umożliwia znalezienie odpowiednich punktów porównawczych dla różnych materiałów filtracyjnych. Na ogół są porównywane punkty charakterystyki przepływowej dla powietrza oraz dla cieczy wzorcowej (woda lub olej) o znormalizowanym składzie chemicznym w ściśle określonej temperaturze.

W zakresie badań punktów charakterystyki odfiltrowania istotne znaczenie ma określenie metody pomiarowej i czynnika filtrowania (gaz, ciecz) ze względu na duże rozbieżności w wynikach badań filtrowania cieczy i gazów, wynikające w obu przypadkach z odmienności zasad zatrzymywania zanieczyszczeń.

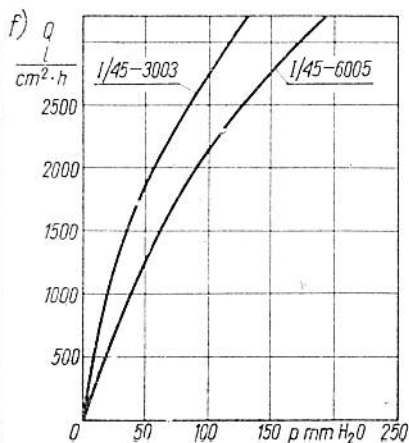
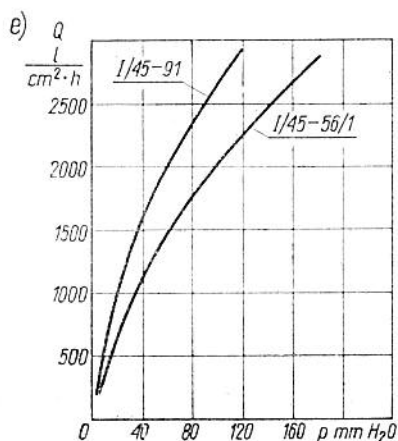
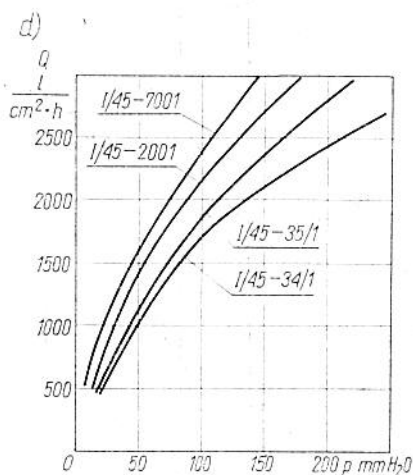
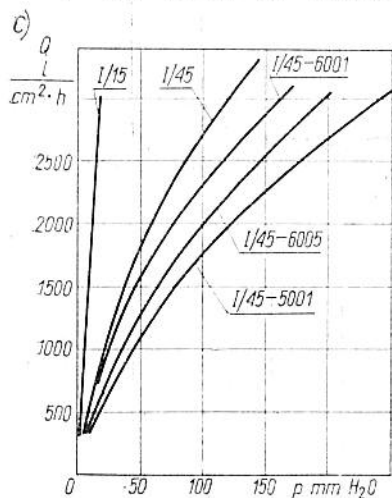
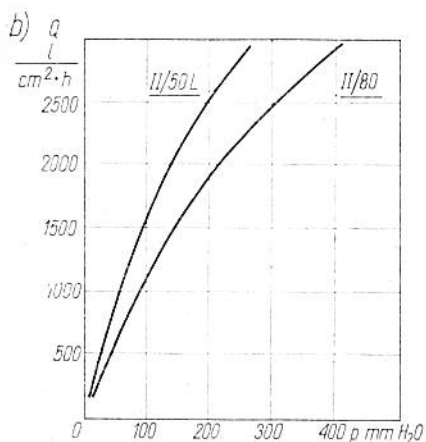
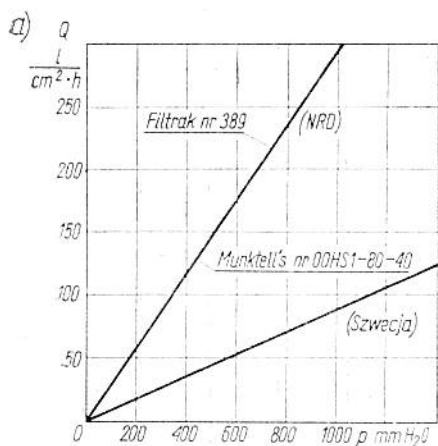
Wydaje się jednak, że jedynie obiektywną ocenę własności filtracyjnych różnych materiałów można przeprowadzić przedstawiając wyniki badań w postaci znormalizowanej charakterystyki odfiltrowania.

2.3.4. Przykładowe charakterystyki papierów filtracyjnych

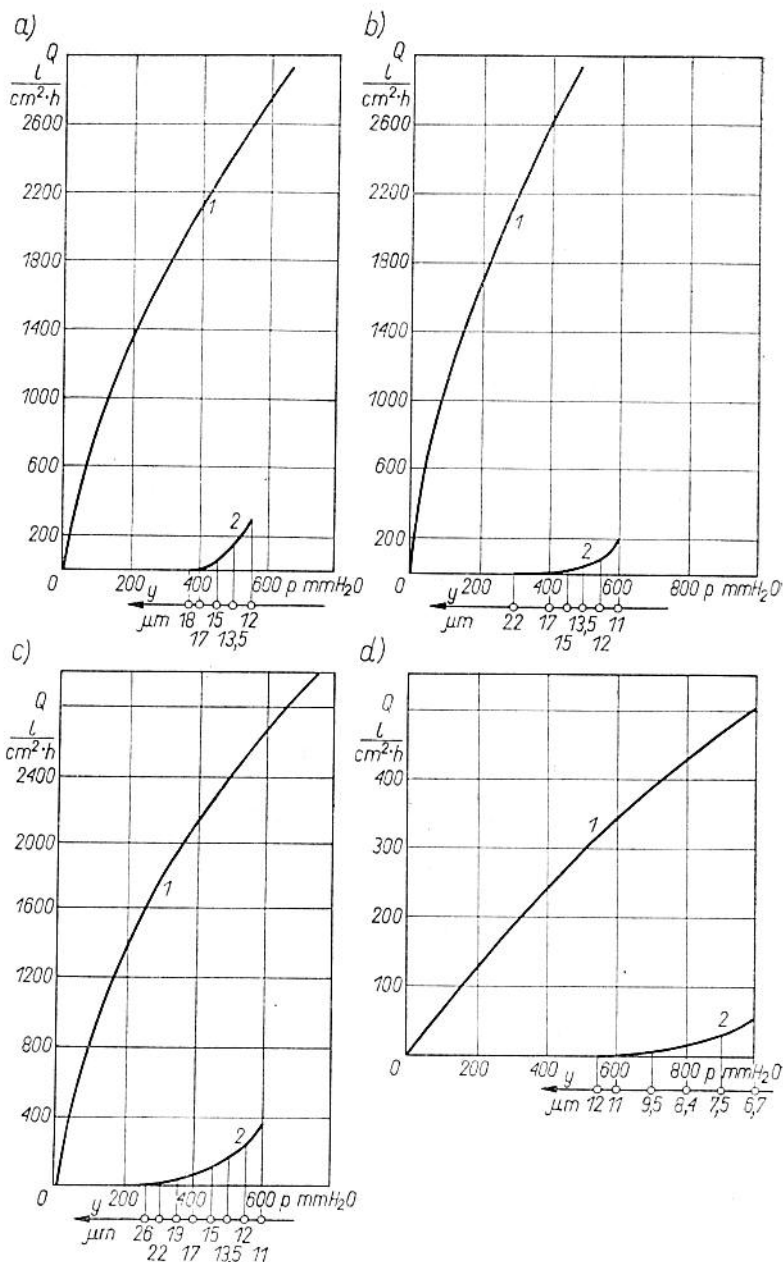
Metody pomiarowe stosowane do oceny własności różnych materiałów porowatych (np. metalowych filtrów spiekanych oraz sit filtracyjnych), wykorzystane w badaniach papierów filtracyjnych, nie ulegają zasadniczej zmianie. Jedyną różnicą jest konieczność stosowania mniejszych powierzchni próbek papierów w porównaniu np. z materiałami spiekanymi. Użycie sit podporowych i rusztów podtrzymujących wykazuje, że błędy popełniane przy tym są porównywalne z błędami wynikającymi z przyjęcia mniejszej powierzchni próbek papierów do badań.

W celu zorientowania się czy posiadane papierowe materiały filtracyjne mogą być zastosowane w filtrach płynów roboczych, należy przeprowadzić wstępną selekcję polegającą na obserwacjach wizualnych, badaniach mikroskopowych struktury materiałów oraz badaniach zachowania się wybranych próbek przy statycznym i dynamicznym oddziaływaniu płynu roboczego. Próbkę badanych papierów nie powinny zmieniać struktury włóknistej w ciągu trzymiesięcznego okresu przetrzymywania ich w płynie roboczym.

Przykładowe charakterystyki przepływu powietrza przez papiery filtracyjne, określające jednostkowe natężenie przepływu w funkcji spadku ciśnienia, przedstawiono na rys. 2.8. Na rysunku tym zamieszczono charakterystyki przepływu przez wybrane bi-



Rys. 2.8. Charakterystyki przepływowe wybranych materiałów filtracyjnych papierowych

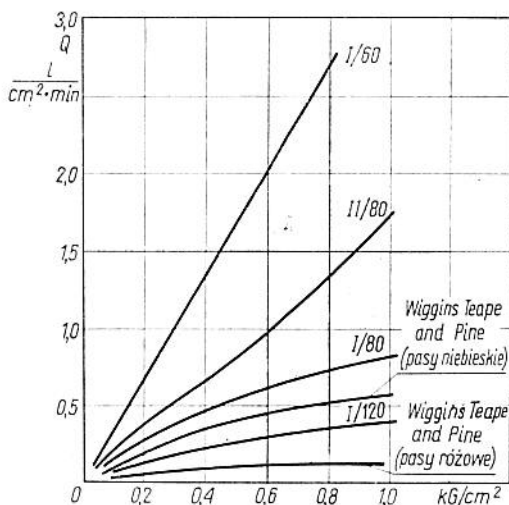


Rys. 2.9. Charakterystyki przepływowe powietrza dla: materiałów papierowych: a) Paratex I/120, b) Paratex I/80, c) Wiggins Teape and Pine — pasy niebieskie, d) Wiggins Teape and Pine — pasy różowe; 1 — przepływ powietrza przez próbkę suchą, 2 — przepływ powietrza przez próbkę nasączoną wodą i odpowiadające wymiary otwieranych porów obliczone z zależności $y[\mu\text{m}] = 6700/p[\text{mmH}_2\text{O}]$

buły filtracyjne Filtrak (NRD) i Munktell's (Szwecja) oraz przez cztery grupy (I—IV) wyrobów tekstylnych Paratex firmy Lohman KG Fahr/Rhein (NRF) typu „papierów”, o następującym składzie: I — 100% wełna, II — 50% wełna + 50% bawełna, III — 70% + 60% bawełna.

Na rys. 2.9 przedstawiono charakterystyki przepływu powietrza przez próbkę suchą i przez próbkę papieru nasączonego wodą destylowaną oraz wymiary kolejno otwieranych porów przy wzroście różnicy ciśnień na badanym materiale.

Przykładowe charakterystyki przepływu oleju mineralnego przez papiery filtracyjne przedstawiono na rys. 2.10. Użyty dla porównania papier filtracyjny firmy Wiggins Teape and Pine (Anglia) jest przeznaczony do filtrowania olejów (pasy niebieskie) oraz



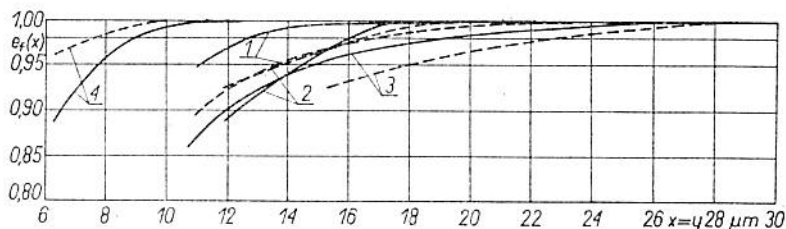
Rys. 2.10. Charakterystyki przepływowe oleju mineralnego ($\mu 18^{\circ}\text{C} = 38 \pm 2\text{cP}$) dla wybranych próbek materiałów

paliw (pasy różowe). Przebiegi początkowych charakterystyk od-filtrowania w zakresie 0,9÷1 przedstawiono na rys. 2.11, na którym podano w celach porównania po dwa przebiegi wyznaczone przy zastosowaniu różnych metod.

Zamieszczone zestawienie wyników badań charakterystyk przepływowych i filtracyjnych dla cieczy roboczych należy uważać za orientacyjne.

Badania trwałości papierów filtracyjnych należy prowadzić z punktu widzenia praktycznego oznaczenia odporności na działanie „statyczne” cieczy i gazów, obserwacji zachowania się pró-

bek w przepływającym płynie oraz czasu pracy (czasu filtrowania). Badania porównawcze papierów filtracyjnych rozumiane jako badania mające na celu wyznaczenie czasu filtrowania różnych materiałów, po którym nastąpi krytyczny wzrost ciśnienia filtro-



Rys. 2.11. Charakterystyki odfiltrowania $e_f(x)$ papierowych materiałów filtracyjnych: 1 — Paratex I/80, 2 — Paratex I/120, 3 — Wiggins Teape and Pine — pasy niebieskie, 4 — Wiggins Teape and Pine — pasy różowe; linią ciągłą uzyskane wyniki metodą dwu przepływów, linią przerywaną — metodą testową z zastosowaniem proszku kulistego szklanego oraz filtrowania oleju mineralnego

wania przy stałym natężeniu przepływu lub też zmniejszenie natężenia przepływu oleju do wartości krytycznej (określonej warunkami technicznymi) przy stałym natężeniu przepływu, albo też zmniejszenie natężenia przepływu oleju do wartości krytycznej (określonej warunkami technicznymi) przy stałym ciśnieniu filtrowania, można przeprowadzić jedynie dla ustalonych parametrów zanieczyszczeń (stały rozkład wymiarowy i stała koncentracja). Zmiana warunków doświadczenia przy badaniu różnych materiałów utrudnia opracowanie wyników i czyni je mniej przejrzystymi.

Przykładowo do badań wybrano cztery próbki materiałów (papiery Wiggins Teape — pasy niebieskie i różowe; Paratex — I/80 i I/120). Badania polegały na pomiarze czasu t_i , po którym natężenie $Q(t_i)$, przy stałym i jednakowym dla wszystkich próbek ciśnieniu filtrowania, zmaleje do połowy początkowego natężenia przepływu Q_0 (czysty materiał filtracyjny). Ze względu na to, że wybrane do badań materiały różnią się między sobą dokładnością filtrowania, przyjęto do oceny bezwymiarowy wskaźnik względnego spadku natężenia przepływu (czasy t_1, t_2, t_3, t_4) odniesiony do materiału, którego pory są najszybciej zatykane. Otrzymane wyniki: 1) materiał Wiggins Teape (pasy różowe) — $t_1/t_1 = 1$; 2) Paratex I/120 — $t_2/t_1 = 8$; 3) Wiggins Teape (pasy niebieskie) — $t_3/t_1 = 20$ oraz 4) Paratex I/80 — $t_4/t_1 = 45$. Oznacza to, że powierzchnie F_i filtrów zbudowanych z tych materiałów i pracujących w takich samych warunkach (pominięto tutaj zagadnienie dokładności oczyszczania) powinny kształtować się następująco:

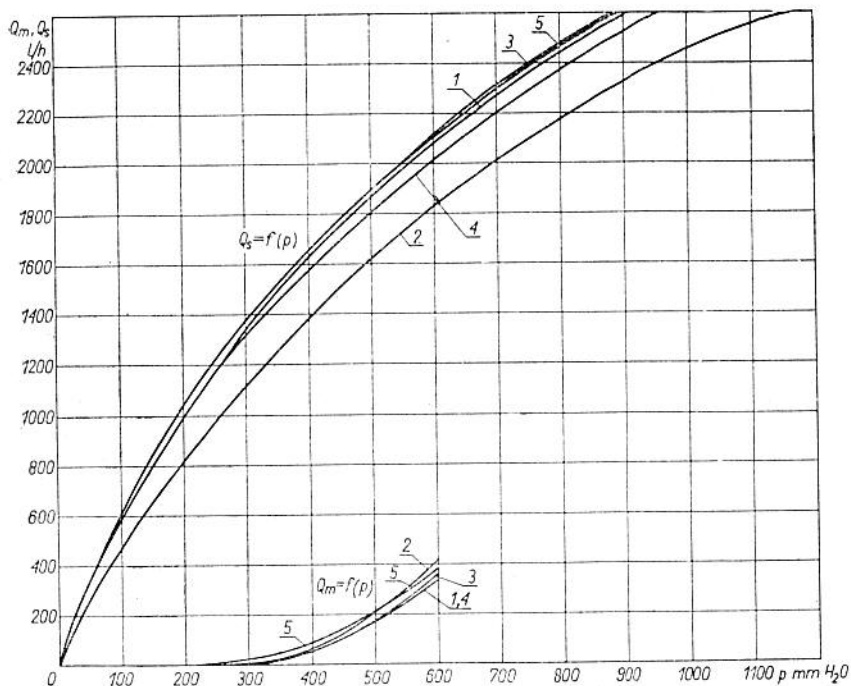
$F_1 = F_1$; $F_2 = 0,125 F_1$; $F_3 = 0,05 F_1$; $F_4 = 0,02 F_1$. Dane te są orientacyjne, ale dobrze charakteryzują trwałość różnych papierów filtracyjnych.

Innym zagadnieniem oceny trwałości filtrów papierowych jest czas eksploatacji. Dla filtrów papierowych hydraulicznych pełnego przepływu (ssawnych, ciśnieniowych lub spływowych) czas eksploatacji wynosi 20÷70 godzin i rzadko kiedy przekracza 100 godzin. Wkłady filtracyjne papierowe nie są poddawane regeneracji, co stanowi w wielu przypadkach utrudnienie w eksploataowaniu urządzenia hydraulicznego. Chociaż powierzchnia filtracyjna w typowych rozwiązaniach filtrów papierowych jest 2÷10 razy większa niż w odpowiednich filtrach granulkowych lub siatkowych, to jednak filtry granulkowe pracują poprawnie przy spadku ciśnień do 10 kG/cm² (a nawet do 50 kG/cm²), umożliwiają wielokrotną regenerację (najczęściej powyżej 10 razy) oraz ich czas eksploatacji odpowiada czasowi łącznej eksploatacji (zużyciu) przynajmniej 10÷30 wkładów papierowych. Potwierdzają to wyniki badań porównawczych przeprowadzonych na próbkach papieru Wiggins Teape (pasy niebieskie) i próbce filtru granulkowego o dokładności nominalnej ok. 22 μm i grubości ścianki 2 mm. Próba papieru filtracyjnego (dla porównania przyjęto powierzchnię 1 cm²) umożliwiła przefiltrowanie oleju ze stoiska laboratoryjnego w ilości ok. 5 litrów, natomiast próbka ww. spieku (1 cm²) — ok. 110 litrów oleju — po 10 regeneracjach, ale przy znacznie wyższym ciśnieniu filtrowania.

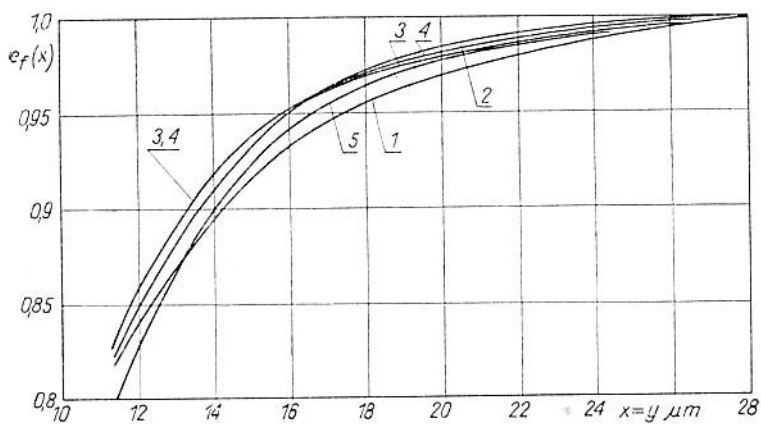
W ocenie własności filtracyjnych papierów należy brać pod uwagę nie tylko uzyskiwaną dokładność filtrowania, określoną uśrednioną charakterystyką odfiltrowania, ale również rozrzuty charakterystyki wynikające z różnego ukształtowania wkładu filtracyjnego, sposobu zamocowania (przecięcia, klejenie, szycie itp.) oraz obciążenia przepływem płynu. Przykład rzeczywistej rozbieżności wyników podstawowych charakterystyk w przypadku takiego samego materiału (pięć próbek) przedstawiono na rys. 2.12 (Q_s — przepływ powietrza przez suchą próbkę, Q_m — przepływ przez próbkę nasączoną wodą) oraz charakterystyki odfiltrowania tych próbek papierów filtracyjnych — na rys. 2.13.

Drugim ważnym zagadnieniem w zakresie eksploatacji papierów filtracyjnych jest zmiana charakterystyki przepływowej w czasie filtrowania. Jeżeli założymy stały spadek ciśnienia na filtrze oraz stałe parametry płynu i zawartych w nim zanieczyszczeń, to przykładowe przebiegi mają charakter określony jak na rys. 2.14. Próby aproksymacji tych zależności przeprowadzone dla jednego przebiegu przedstawiono na rys. 2.15.

Na zmianę charakterystyki przepływowej w czasie ma wpływ ilość osiadłych zanieczyszczeń. W początkowych fazach filtrowania



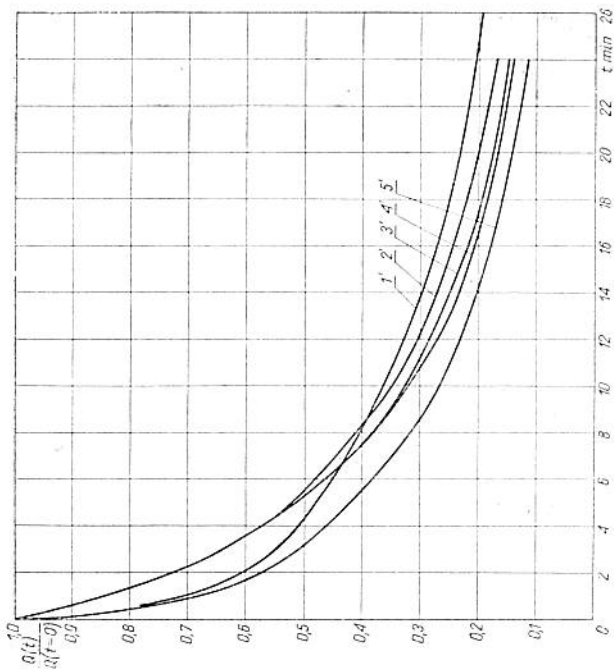
Rys. 2.12. Charakterystyki przepływowe pięciu próbek papierów filtracyjnych z jednakowego materiału; 1 do 5 — numery próbek



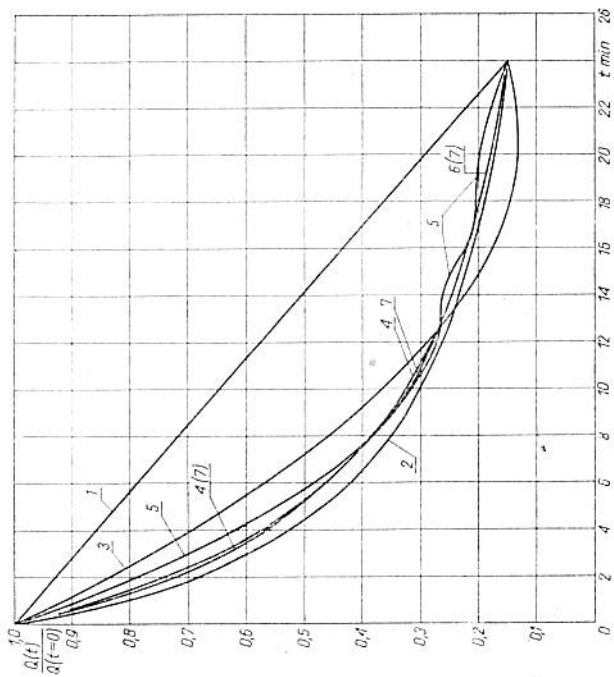
Rys. 2.13. Charakterystyki odfiltrowania pięciu próbek papierów filtracyjnych z jednakowego materiału; 1 do 5 — numery próbek

Tablica 2.1. Podstawowe własności materiałów Paratex firmy LOHMAN KG FAHR/RHEIN

Nazwa parametru	Symbol materiału																
	I/15	I/20	I/45	I/60	I/80	I/100	II/30	II/80	II/100	III/40	III/80	III/100	IV/20FL	IV/80	IV/100		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
Gramatura, g/m ²	15,0	20,0	45,0	60,0	80,0	100,0	30,0	80,0	100,0	40,0	80,0	100,0	20,0	80,0	100,0		
Grubość, mm	0,06	0,09	0,15	0,18	0,25	0,28	0,22	0,35	0,5	0,18	0,33	0,34	0,09	0,2	0,65		
Obciążenie niszczące w kG przy szerokości taśmy 50 mm	mokry	wzdłuż	4,0	6,0	16,0	24,0	30,0	42,0	3,5	11,0	22,0	10,0	17,0	32,0	2,5	4,0	15,0
		w poprzek	0,5	0,8	3,5	5,0	7,0	9,0	0,3	1,3	3,5	1,7	3,6	8,5	0,2	0,3	2,0
	suchy	wzdłuż	1,5	2,0	5,0	7,5	9,5	14,0	0,9	2,5	6,0	2,8	5,9	10,0	0,8	0,9	4,5
		w poprzek	0,08	0,15	0,6	0,9	1,2	1,7	0,07	0,3	0,5	0,3	0,6	1,0	0,07	0,08	0,4
Wydłużenie względne w % przy rozrywaniu na długości mocowania 200 mm i szerokości taśmy 50 mm	suchy	wzdłuż	3,0	5,0	3,0	6,0	5,0	7,0	8,0	4,0	3,0	4,0	4,0	6,0	5,0	4,0	2,0
		w poprzek	3,0	5,0	3,0	5,0	6,0	7,0	8,0	7,0	3,0	4,0	3,0	4,0	14,0	4,0	2,0
	mokry	wzdłuż	12,0	15,0	10,0	15,0	15,0	15,0	10,0	10,0	10,0	11,0	19,0	13,0	14,0	12,0	10,0
		w poprzek	15,0	18,0	15,0	18,0	20,0	17,0	14,0	14,0	10,0	12,0	14,0	14,0	38,0	16,0	10,0
Wyrzucalność na	ciśnienie kG/cm ²	0,12	0,24	0,46	0,74	1,11	1,46	0,17	0,5	0,53	0,38	0,55	0,78	0,21	0,16	0,5	
	strzałka ugięcia, mm	8,0	15,0	8,0	10,0	10,0	9,0	11,0	11,0	11,0	10,0	10,0	10,0	11,0	11,0	14,0	
Higroskopijność wg DIN 53923,	%	300	400	440	470	350	290	710	540	650	360	510	480	590	800	570	
chłonność wody, g	H ₂ O/m ²	45,0	80,0	198,0	280,0	280,0	290,0	213,0	430,0	650,0	144,0	410,0	480,0	118,0	218,0	570,0	
Wrażliwość na wilgoć Wysokość nasiąkania w cm wg DIN 53924	po 10 s	0,3-0,5	1,4-2,0	2,4-3,4	2,7-3,5	2,7-3,1	2,6-3,0	2,4-3,5	3,3-3,6	3,1-3,8	2,6-3,0	3,4-4,0	3,0-3,7	1,2-2,0	2,8-3,5	2,8-3,3	
	po 30 s	—	2,2-3,1	3,8-5,3	3,8-4,9	4,2-5,2	4,4-4,6	3,8-5,2	4,8-5,6	3,9-5,3	4,0-5,4	5,4-5,8	5,1-5,6	2,5-3,1	3,8-5,0	4,6-5,2	
	po 60 s	—	2,7-4,3	5,5-7,0	5,4-6,7	6,2-7,2	6,0-6,2	5,2-6,6	6,3-7,6	5,3-6,4	5,4-6,0	6,6-7,3	6,6-7,0	3,0-4,5	6,0-6,9	5,6-6,6	
Zawartość wilgoci po dłuższym składowaniu w %		13,0 ← od do → 9,0					10,0 ← od do → 8,0			9,0 ← od do → 8,0			9,0 ← od do → 6,0				
Trwałość chemiczna na przebywanie w temp. 20 °C	w 10% NaOH po 5 min	bardzo rozluźniony					wełna b. rozluźniona bawełna odporna			wełna b. rozluźniona bawełna odporna			wełna b. rozluźniona bawełna odporna				
	w 32% HCl po 30 min	nie zerwany					nie zerwany			nie zerwany			nie zerwany				
Odporność na temperaturę po 15 min	120 °C	nie żółknie			lekko żółty		nie żółknie		lekko żółty	nie żółknie		lekko żółty	nie żółknie		lekko żółty		
	140 °C	lekko żółty					lekko żółty			lekko żółty			lekko żółty				
	160 °C	bardzo żółty					bardzo żółty			bardzo żółty			bardzo żółty				
Przepuszczalność powietrza p = 20 mm H ₂ O	l/(m ² ·s)	—	—	1410	865	480	440	1840	975	810	2350	525	500	—	1980	770	
Przepuszczalność wody p = 40 mm H ₂ O	l/(m ² ·s)	2,4 ← od do →					od do						→ 1,9				
Stała dielektryczna wg DIN 53483	Oe	1,0 ← od do →					od do						→ 1,3				
Napięcie przebicia	kV	0,4 ← od do →					od do						→ 0,7				
Wymiar porów wyznaczony metodą ziarna poniżej, μm		350	295	105	85	85	45	145	125	145	145	125	105	145	150	105	

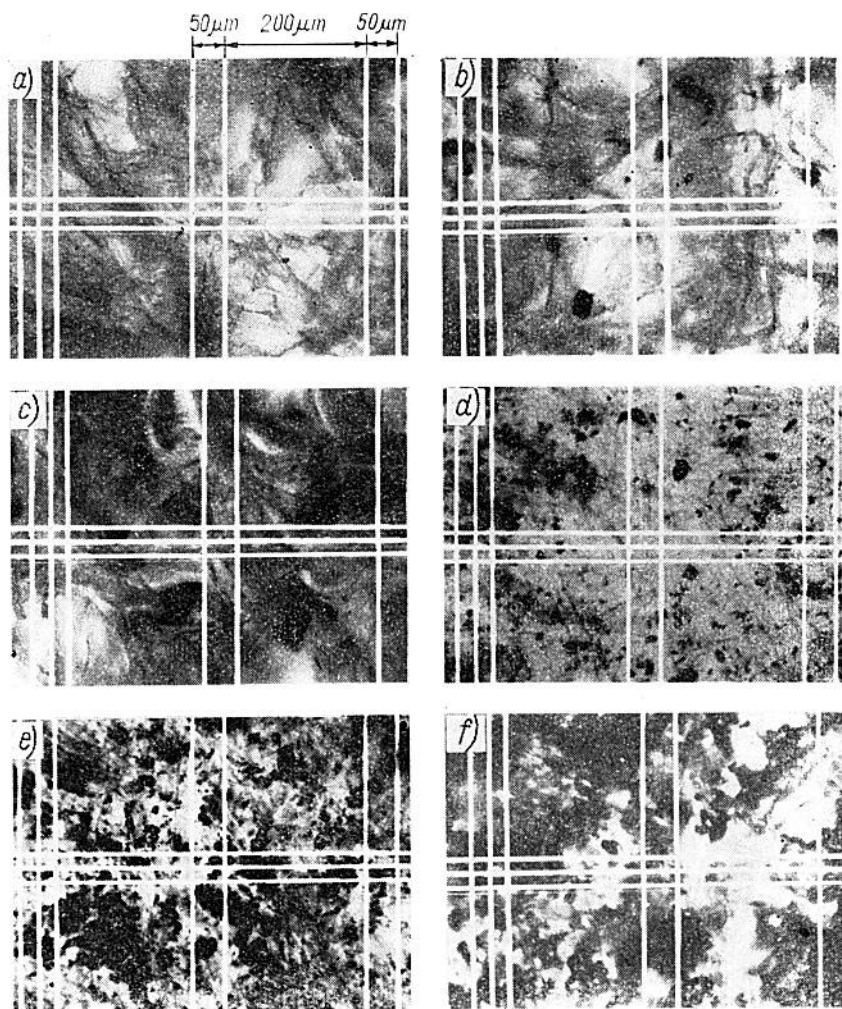


Rys. 2.14. Zmiana natężenia przepływu w czasie przy stałych natężeniach płynu filtrowanego; 1' do 5' — numery próbek



Rys. 2.15. Przykłady aproksymacji analitycznej zmian natężenia przepływu $Q(t)/Q(0)$ płynu w czasie, przez papier filtracyjny, przy stałych parametrach filtrowania; 1 — $1 - kt$, 2 — $1/(1 + k_1 t)$, 3 — $1 - k_1^I t + k_2^I t^2$, 4 — $1/(1 + k_1^I t + k_2^I t^2)$, 5 — $1 - k_1^{III} t + k_2^{III} t^2 - k_3^{III} t^3$, 6 — $1/(1 + k_1^{IV} t + k_2^{IV} t^2 + k_3^{IV} t^3)$, 7 — wynik doświadczenia (próbka 3' z rys. 2.14)

nia liczba zatrzymanych cząstek jest niewielka, a w miarę filtrowania wzrasta, aż występuje tak silne zanieczyszczenie wkładu papierowego, przy którym przepływ staje się niemożliwy, bądź też następuje uszkodzenie wkładu. Na rys. 2.16 pokazano przykładowo

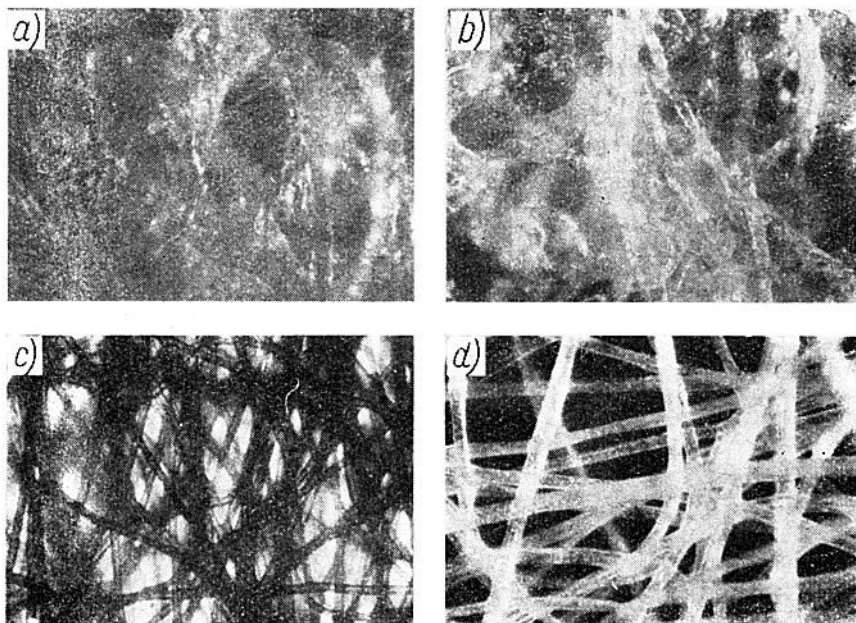


Rys. 2.16. Kolejne fazy osadzania się zanieczyszczeń na papierze filtracyjnym. Próbką a) przedstawia papier czysty, próbka f) papier silnie zanieczyszczony, na którym nie są wyróżnione poszczególne cząstki zanieczyszczeń

kolejne fazy osadzania się zanieczyszczeń na próbce papieru filtracyjnego podczas filtrowania oleju mineralnego.

Materiały papierowe charakteryzują się specyficzną nieregularną strukturą.

Na rys. 2.17 przedstawiono mikrostruktury papierowych materiałów filtracyjnych o malejącej dokładności oczyszczania.



Rys. 2.17. Fotografie papierów filtracyjnych o różnej nominalnej dokładności filtrowania (w mikrometrach): a, b) Wiggins Teape and Pine, odpowiednio 5 i 20, c, d) Paratex, odpowiednio 50 i 100

W celu scharakteryzowania ogólnych własności materiałów filtracyjnych włókninowych w ogóle, a papierowych w szczególności, rozpatrzono przykładowo własności materiałów Paratex.

Firma produkująca te materiały podkreśla ich następujące zalety: wyjątkowo dobre własności przepływowe gazów i cieczy, dużą czystość chemiczną, obojętność na jony pH, dużą porowatość, stałość wymiarów, odporność na starzenie się, odporność na działanie temperatury do 160°C, duża wytrzymałość na rozciąganie w stanie mokrym i inne.

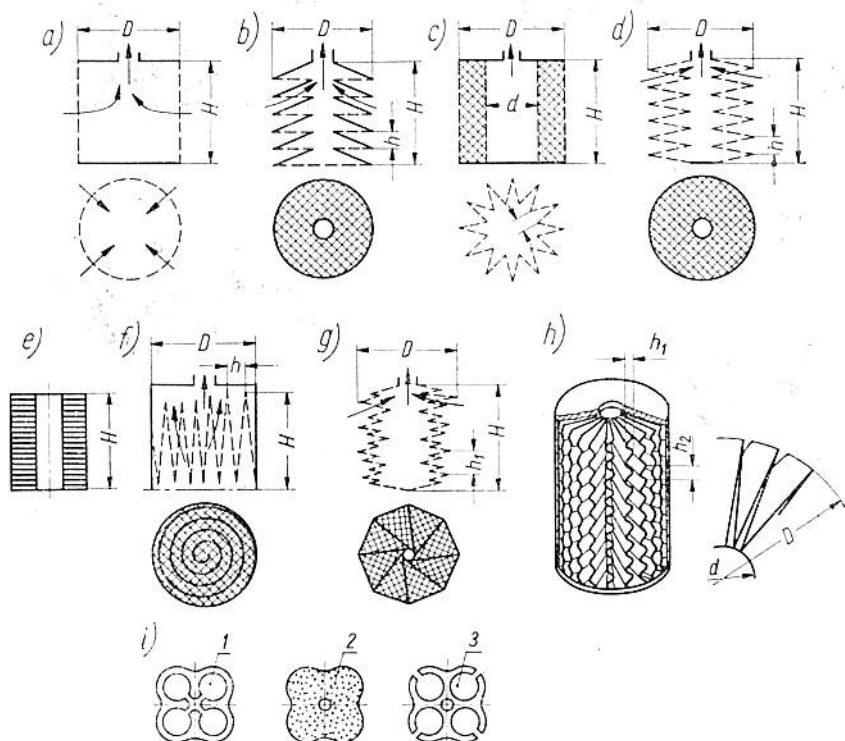
Materiały Paratex można impregnować roztworami organicznymi. Zestawienie podstawowych własności materiałów Paratex przytoczono w tabl. 2.1, opierając się na danych katalogowych do-

starczonych przez firmę. W zakresie zastosowań technicznych materiały Paratex są używane m. in. jako filtry farb, lakierów oleju wrzecionowego, emulsji olejowych itd. Ze względu na brak dostatecznych danych eksploatacyjnych, firma zaleca dobieranie właściwego materiału na podstawie prób.

Materiały Paratex są dostarczane w rolkach ϕ 80 o szerokości 150 cm.

2.3.5. Budowa wkładów filtracyjnych

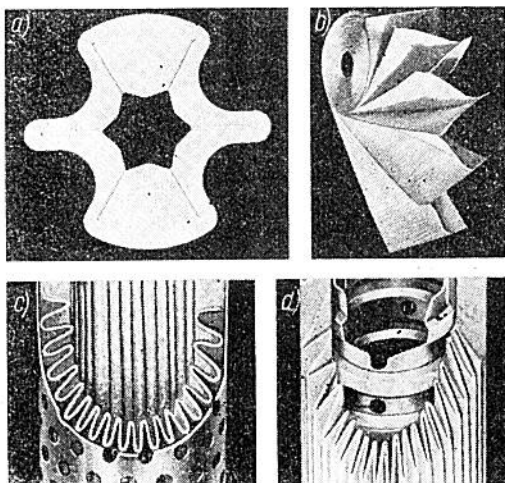
Zastosowanie papieru w budowie wkładów filtracyjnych cechuje zasadnicza tendencja prowadząca się do zawarcia możliwie największej powierzchni materiału w określonej rozsądnymi



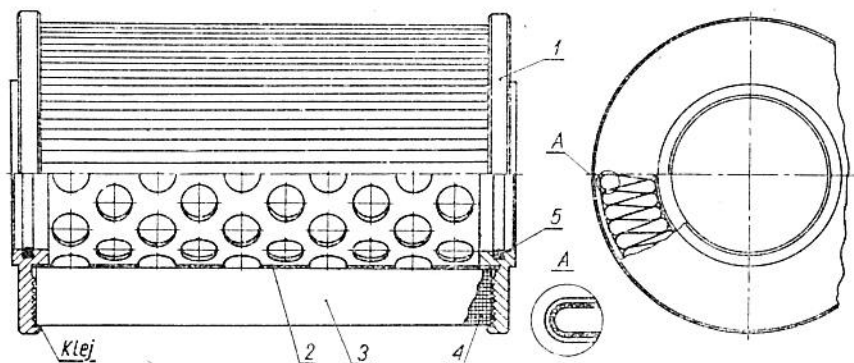
Rys. 2.18. Podstawowe schematy konstrukcyjne papierowych wkładów filtracyjnych: a) cylindryczny, b) talerzowy jednostronny, c) gwiazdowy, d) talerzowy dwustronny, e) cylindryczny składany w postaci stosu płytek f) zwijany, g) związany i skręcony, h) grzbietowo-pofałdowany, i) składany z przekładkami

warunkami gabarytowymi objętości. Nie mniej stosowane są różne inne konstrukcje wkładów filtracyjnych ze względu na specyfikę zastosowań oraz własności mechaniczne i filtracyjne papierów.

Podstawowe schematy budowy papierowych wkładów filtracyjnych przedstawiono na rys. 2.18. Na szczególną uwagę zasługują schematy c, f i h. Schemat wg rys. 2.18c przedstawia najbardziej rozpowszechnioną konstrukcję wkładu typu gwiazda, sche-



Rys. 2.19. Fragmenty budowy wkładów filtracyjnych: a) kształt papieru wkładu składanego, b) kształt zwojowy (CAV), c, d) kształty typu gwiazda (Pall) odpowiednio z podporą zewnętrzną i rusztem wewnętrznym

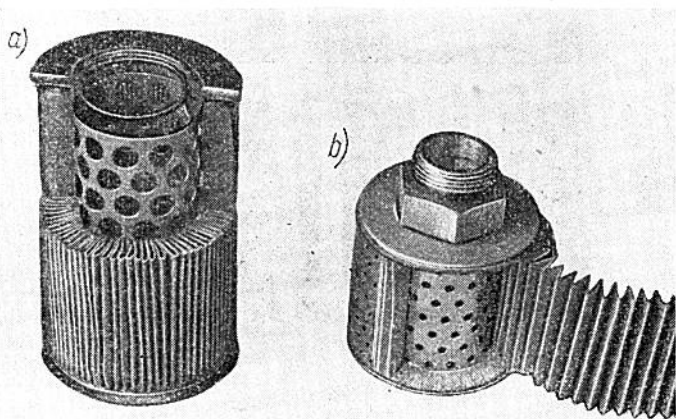


Rys. 2.20. Schemat konstrukcyjny papierowego wkładu filtracyjnego; 1 — koinierz bakelitowy, 2 — karkas metalowy, 3 — papier filtracyjny, 4 — siatka wzmacniająca, 5 — uszczelnienie

mat wg rys. 2.18 konstrukcję zwojową a wg rys. 2.18h — grzbietowo-pofałdowaną — odmiana gwiazdy pofałdowana na grzbietach (typ chevronnes). Schemat wg rys. 2.18c obrazuje wkład składany z elementów papierowych wycinanych w dowolnym kształcie, natomiast schemat wg rys. 2.18i — fragment budowy zespołu filtracyjnego z dwiema przekładkami nieporowatymi 1 i 2 oraz wyciętej przegrody z papieru filtracyjnego 3.

Fragmenty budowy typowych papierowych wkładów filtracyjnych przedstawiono na rys. 2.19.

Schemat konstrukcji papierowego wkładu filtracyjnego pokazano na rys. 2.20. Wkłady o takiej konstrukcji są przeznaczone do jednorazowego użytku. Odmiany konstrukcyjne olejowych wkładów papierowych pokazano na rys. 2.21.



Rys. 2.21. Fotografie papierowych wkładów filtracyjnych z wycięciami pokazującymi ich budowę konstrukcyjną: a) wkład do zamocowania na trzpieniu cylindrycznym, z dwoma pierścieniami uszczelniającymi, b) wkład z jednym otworem wypływowym

2.4. Porowate materiały spiekane

2.4.1. Materiały i wykonanie porowatych materiałów spiekanych

Oprócz tradycyjnych materiałów używanych do wykonania filtrów (bawełny, wełny, filcu, papieru, kartonu, materiałów ceramicznych) zaczęto stosować stosunkowo niedawno *zwarte materia-*

ły *granulkowe*, umożliwiające filtrowanie płynów w znacznie rozszerzonych warunkach pracy urządzeń płynowych.

Należy do nich filtrowanie płynów gorących o zakresie temperatury 500÷1600°C i zmianach (wahaniach) ciśnienia płynu dochodzących do 450 kG/cm². Zaletą tych materiałów jest również odporność na działanie znacznych obciążeń mechanicznych i podwyższonych temperatur, bez pogorszenia własności mechanicznych i efektywności filtrowania, co w istotny sposób wpływa na rozwój tego rodzaju filtrów. Stosowanie materiałów filtrujących w różnych dziedzinach i w różnych warunkach pracy utrudnia bardzo przeprowadzanie ścisłej ich klasyfikacji. Zakres ich stosowania jest uzależniony od szczególnych warunków każdego przypadku filtrowania. Wybór materiału, z którego wykonuje się filtr nie zależy tylko od wymiarów cząstek filtrowanych zanieczyszczeń, lecz również od warunków, w których następuje filtrowanie (ciśnienie, temperatura, agresywność płynu, jego własności elektrochemiczne itp.).

Spośród stosowanych materiałów wyjściowych do produkcji porowatych filtrów spiekanych wyróżnia się granulkowe (kuliste i nieregularne) materiały metalowe, ceramiczne, cermetaliczne oraz tworzywa sztuczne.

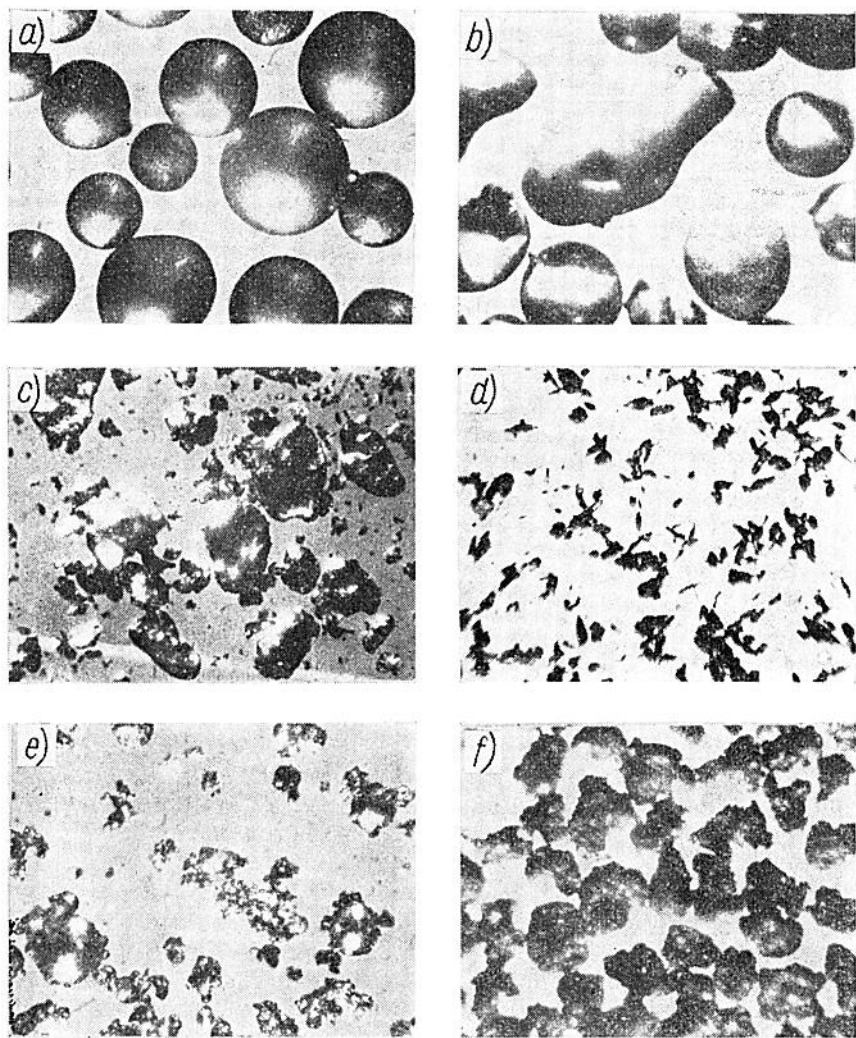
Podstawowym materiałem metalowym stosowanym w produkcji filtrów spiekanych są: brąz cynowy (CuSn 9 do CuSn 11), stale nierdzewne (np. 18% Cr, 10% Ni, 2% Mo, reszta Fe), miedź, nowe srebro (65% Cu, 12% Ni, reszta Zn), żelazo (+ dodatek FeCl₂·6H₂O) nikiel (+ dodatek Ni₃P), stale chromoniklowe, chrom, molibden, aluminium, wolfram, tantal, niob, tytan, cyrkon, srebro i inne.

Cermetale są używane do filtrowania płynów o wysokich temperaturach (borki, węgliki itp.).

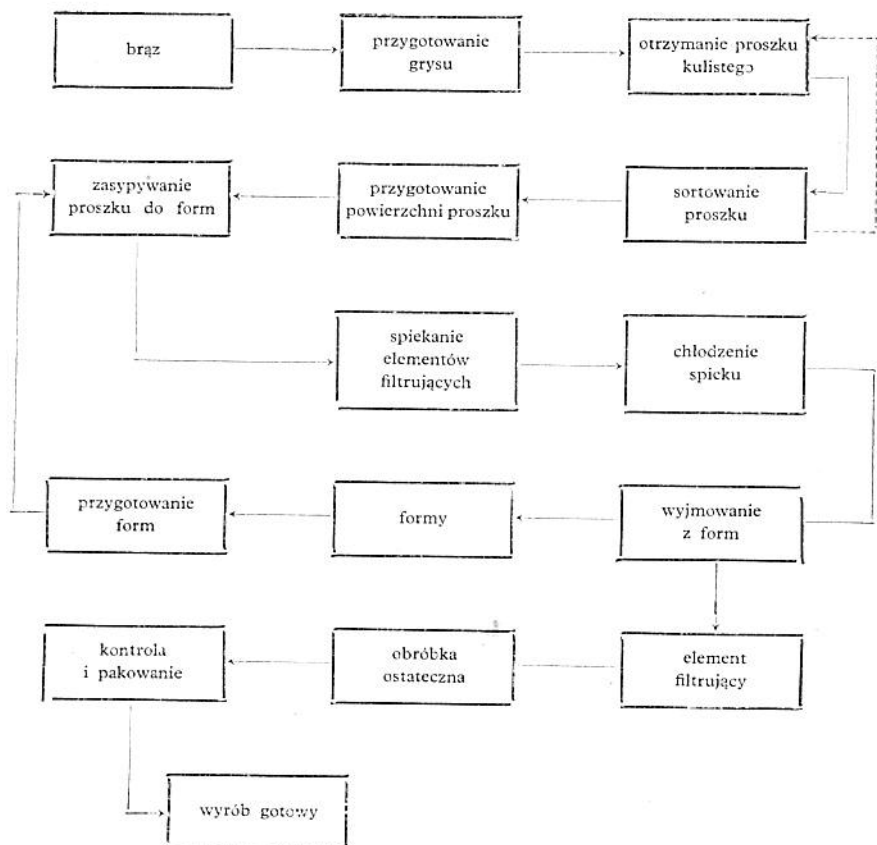
Z tworzyw sztucznych są spotykane materiały typu poliolefin, polichlorofluoroetyleny (teflon), polistyren, PCW i innych. Zajmujemy się przede wszystkim materiałami porowatymi z ziarn metalowych. Mikrofotografie ziarn stosowanych w budowie filtrów spiekanych pokazano na rys. 2.22.

W celu przygotowania elementów filtrujących wytworzonych przy zastosowaniu metod metalurgii proszków, należy przyjąć określony schemat technologiczny. Proces przygotowania filtrów z kulistego (o ziarnach kulistych) proszku brązu odbywa się najczęściej wg następującego schematu technologicznego (rys. 2.23).

Przygotowanie elementów filtrujących może mieć również inny przebieg technologiczny. Wiele wytwórni wykonuje spiekane filtry przez prasowanie proszku w formach stalowych, a następnie spiekanie elementu sprasowanego. Mogą tutaj zachodzić różne warianty w zależności od sposobu prasowania, kształtu proszku, wypełniaczy itd.



Rys. 2.22. Mikrofotografie granulek używanych w budowie metalowych filtrów spiekanych: a) brąz kulisty, b) granulki niesegregowane, c) proszek uzyskany mechanicznie w młynie wirowo-udarowym (Hametag), d) proszek elektrolityczny, e) proszek rozpylany, f) proszek redukowany



Rys. 2.23. Jeden z możliwych schematów technologicznych produkcji spiekanych filtrów kulkowych

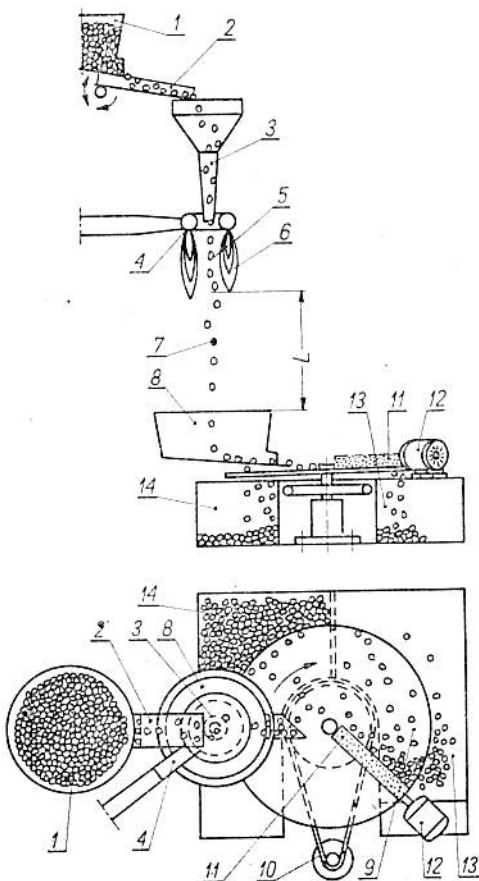
Istnieją dwie zasadnicze grupy metod wytwarzania proszków metali: metody mechaniczne oraz metody fizykochemiczne. Najbardziej interesujące pod względem otrzymywania proszku kulistego (o ziarnach kulistych) są metody mechaniczne. Wyróżniamy wśród nich metody otrzymywania proszku z fazy stałej i z fazy ciekłej. Z metod fizykochemicznych najbardziej jest przydatna metoda otrzymywania proszku z fazy gazowej, szczególnie z karbo-nylków, lub metoda kondensacji (tzw. metoda „metalurgii gazowej”). Ze stanu stałego proszek można otrzymywać przez stosowanie obróbki mechanicznej (zdzieranie, frezowanie, ściernie, tłuczenie, rozbijanie itp.), z fazy ciekłej — przez granulowanie i rozpylanie, z fazy gazowej — przez rozkład ciekłych związków węglo-

wych metali (głównie żelaza i niklu oraz trudniej kobaltu, wolframu, molibdenu i chromu) ogrzanych do temperatury wyższej od temperatury parowania.

Najczęściej są stosowane metody rozpylania ciekłego metalu. Z prostych metod rozpylania ciekłego metalu można wyróżnić następujące:

- a) rozpylanie w strumieniu gazu lub cieczy (metoda RZ),
- b) rozpylanie z oddziaływaniem uderzeniowym (metoda DPG).

Do produkcji granulek kulistych wykorzystuje się często sposób wytwarzania polegający na przejściu materiału wyjściowego przygotowanego w postaci gysu, o wielkości ziarn równej żądanej wielkości kulek, przez obszar temperatury wytworzony we-



Rys. 2.24. Urządzenie do wytwarzania granulek kulistych

wnątrz pierścieniowego płomienia gazowego. W płomieniu tym ziarna topią się i na skutek napięcia powierzchniowego przyjmują kształt kulisty. Tak uformowane kulki przebiegają przez strefę chłodzenia i przechodząc w fazę stałą są zbierane do pojemnika (rys. 2.24).

Sposób ten jest przydatny do wytwarzania kulek o średnicy w granicach od 0,05 do kilku mm. Prosta konstrukcja urządzenia umożliwia produkcję ciągłą kulek o dużej dokładności kształtu. Ma ona wiele zalet umożliwiających wytwarzanie kulek z różnych materiałów (szkło, stopy metali nieżelaznych, stale itp.).

Urządzenie przedstawione na rys. 2.24 składa się ze zbiornika 1 zawierającego materiał wsadowy w postaci gysu, podawanego przenośnikiem wibracyjnym 2 do lejka zsykowego 3, palnika gazowego 4 wykonanego w postaci pierścienia wytwarzającego wysoką temperaturę w strefie 5 przez płomień 6. Ze strefy studzenia 7, uformowane kulki wpadają do odbieralnika 8 na pochyłą tarczę separatora 9. Tarczę separatora napędza silnik elektryczny 10. Obrotowa szczotka 11 napędzana silnikiem 12 służy do zgarniania niewłaściwie uformowanych kulek do zbiornika 13. Kulki właściwie uformowane staczają się po tarczy do zbiornika 14.

W celu formowania kulek o większych średnicach można stosować układ palników pierścieniowych lub też palnik rurowy umożliwiający zwiększenie strefy wysokiej temperatury.

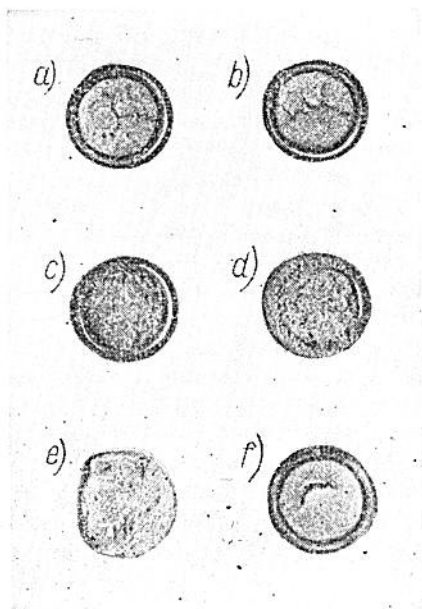
Kulki ze zbiornika 14 podlegają jeszcze dalszej segregacji. Żądane wymiary średnic można uzyskać w dokładny sposób stosując przesiewanie przez sita. Wady w postaci przyklejonych do powierzchni kulek drobnych zanieczyszczeń można usunąć przez bębnowanie lub w urządzeniu wibracyjnym.

Podczas spiekania, przy nieprawidłowo dobranych parametrach, niewłaściwych materiałach, nieprzestrzeganiu zaleceń technologicznych powstaje duży procent braków. *Braki* te można podzielić na *zewnątrzne* i *wewnętrzne*.

Podstawową grupę braków zewnętrznych przedstawiono na rys. 2.25; a, b — pęknięcia na powierzchni ścianki lub pęknięcia na wskroś, c, d — niejednorodność struktury powstała wskutek nieprawidłowego zasypania bądź niewłaściwego zagęszczania proszku, e, f — uszkodzenie filtru wskutek nieprawidłowego materiału formy, „przyklejanie się” filtru do powierzchni, niewłaściwa konstrukcja formy. Braki wewnętrzne powstają głównie wskutek niewłaściwej temperatury spiekania.

Przy produkcji seryjnej można uniknąć powstawanie braków przez ściśle ustalenie i przestrzeganie parametrów technologicznych. Można wykazać, że kulisty kształt ziarn proszku o gładkiej powierzchni jest jednym z najbardziej odpowiednich kształtów w produkcji metalowych filtrów spiekanych. Z punktu widzenia

technologii właściwa gładkość powierzchni ziarn proszku ułatwia zasyp i zagęszczenie form. Proszek o gładkiej powierzchni ziarn ma małą różnicę objętości nasypowej i objętości po zagęszczeniu. Proszki kuliste są trudniej prasowalne lecz łatwiej spiekają się, a za-



Rys. 2.25. Przykłady braków powstałych podczas spiekania

tem w celu uzyskania filtrów o wymaganej porowatości, te cechy stanowią zalety. Proszki o nieregularnym kształcie ziarn (płatki, płytki, „gąbki”) i chropowatej powierzchni po sprasowaniu spiekają się bardzo łatwo, ponieważ już po prasowaniu następuje połączenie ziarn. Powierzchnia „kontaktu” w tych proszkach jest znacznie większa niż w proszkach o ziarnach kulistych, a więc w podwyższonych temperaturach może nastąpić szybsza dyfuzja powierzchniowych atomów.

Spiekanie materiałów filtracyjnych przeprowadza się najczęściej w formach, w atmosferze redukującej lub obojętnej. Stosowane jest również spiekanie ciągle taśm porowatych prasowanych. Wybór sposobu spiekania zależy od możliwości produkcyjnych zakładu oraz od ilości i asortymentu produkowanych filtrów.

Najważniejszym zagadnieniem jest wybór materiału proszku do wytwarzania filtrów. Na filtry hydrauliczne w zasadzie należy

stosować proszki metali lub w wyjątkowych przypadkach — spiekane tworzywa sztuczne, materiały ceramiczne albo cermetale. W przypadku wyrobów z takich materiałów powinny być opracowane wymagania określające zakres ich zastosowań. Rozważymy niżej podstawowe aspekty zastosowań i technologii filtrów spiekanych z proszków metali.

Brąz jest materiałem najczęściej stosowanym w budowie filtrów spiekanych. Stosuje się proszki kuliste w zakresie średnic od 0,04 do 0,4 mm lub proszek niekulisty (o ziarnach niekulistych) o wymiarach 0,04 do 0,2 mm. Filtry z proszku kulistego w praktyce mają porowatość w zakresie 28 do 31%, natomiast z proszku niekulistego w zależności od ciśnienia prasowania — w zakresie 35 do 50% (ciśnienie prasowania rzędu 500 kG/cm²).

Miedź podobnie jak brąz jest dość często materiałem stosowanym do wytwarzania filtrów hydraulicznych. Najczęściej używa się proszku elektrolitycznego o zakresie wymiarów od 0,03 do 0,10 mm. Temperatura spiekania wynosi od 700 do 1070°C w zależności od kształtu ziarn proszku i ich wymiarów, stanu powierzchni ziarn, dodatków, stopnia sprasowania oraz czasu trwania procesu. Zarówno proszek brązu, jak i miedzi bardzo często przed prasowaniem lub spiekaniem jest poddawany chemicznej obróbce powierzchni. Materiał form do spiekania stanowi grafit, stal chromowana lub stal o zawartości powyżej 12% Cr. Czas spiekania wynosi od 15 minut do 12 godzin. Najbardziej odpowiednim okresem spiekania jest czas wynoszący ok. 3 godzin.

Żelazo i jego stopy może być również stosowane do wytwarzania filtrów olejowych. Ze względu na nieco wyższe temperatury spiekania niż filtrów z brązu i miedzi, bo wynoszące 1100 do 1300°C, oraz małą odporność korozyjną są rzadziej stosowane. Dodatek FeCl₃·6H₂O umożliwia regulację porowatości i gęstości filtrów spiekanych. Uzyskiwane porowatości filtrów z niekulistego proszku żelaza z dodatkiem wypełniacza w granicach 3 do 10%, przy ciśnieniu prasowania ok. 3000 kG/cm², wynoszą od 44 do 60%. Stosowane są filtry z proszku żelaza pokrywanego miedzią.

Nikiel, stale chromoniklowe i ich stopy przy zastosowaniu odpowiednich zabiegów technologicznych nadają się do wytwarzania filtrów o dużej wytrzymałości i porowatości dochodzącej do 70%. Uzyskiwanie takich filtrów jest uzależnione od jakości proszku i doboru wypełniaczy. Ponadto przy produkcji filtrów z niklu jest wymagane stosowanie większej liczby operacji, co powoduje znaczne zwiększenie czasu wykonania i podwyższa koszt wyrobu. Zaletą filtrów z niklu lub jego stopów jest duża odporność korozyjna i możliwość zastosowania w układach pracujących w wysokich temperaturach.

Aluminium ma wiele zalet, do których należy przede wszystkim niska cena i mały ciężar. Filtry spiekane z proszku aluminium, jak dotychczas nie znalazły większego zastosowania ze względu na duże trudności przy spiekaniu. Uzyskiwane dotychczas znanymi sposobami materiały porowate z proszku aluminium mają małą wytrzymałość i są kruche, co dyskwalifikuje zastosowanie ich w układach hydraulicznych wysokociśnieniowych.

Inne materiały porowate z proszków metali (np. wolfram, molibden, tytan, niob, chrom, cyrkon) aczkolwiek mają wiele zalet, to jednak ze względu na duży koszt wykonania nie znalazły zastosowania w szerszym zakresie w urządzeniach hydraulicznych. Nie mniej jednak należy się spodziewać, że wzrost wymagań stawianych w technice urządzeń płynowych spowoduje konieczność stosowania filtrów wykonywanych z takich metali lub ich stopów.

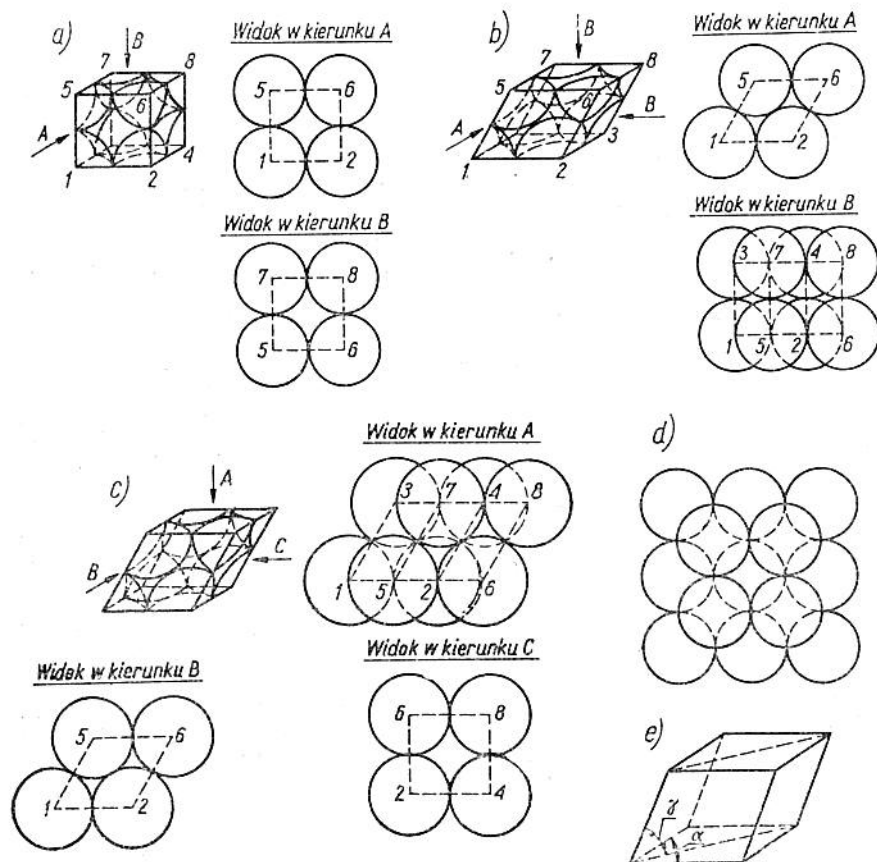
2.4.2. Dyskusja kształtu i ułożenia granulek metalowych filtrów spiekanych

Wybór kształtu ziarn proszku wyjściowego do produkcji filtrów ma istotne znaczenie, gdyż decyduje on o własnościach wykonywanych filtrów.

Filtry kulkowe (o ziarnach w kształcie kulek) charakteryzują się większą zdolnością regeneracji w porównaniu z filtrami wykonanymi z proszku niekulistego (o ziarnach niekulistych). W przypadku jednak ziarn niekulistych o gładkich powierzchniach, *zdolność regeneracji*, rozumiana jako możliwość pełnego oczyszczenia wkładu z osiadłych zanieczyszczeń przy zastosowaniu określonej metody regeneracji, jest praktycznie jednakowa.

W filtrach kulkowych łatwiej można uzyskać w procesie technologicznym jednorodność wymiarów porów, a zatem zapewnić ściśle określoną efektywność filtrowania. Spełnienie tego warunku w przypadku filtrów wykonanych z proszku niekulistego jest utrudnione, chociaż zapewnia ono uzyskanie dodatkowych korzyści. Mianowicie w przypadku konieczności uzyskania małego rozrzutu porów filtru wykonanego z proszku niekulistego jest możliwy taki dobór średnich wymiarów ziarn, aby przez dodanie odpowiednich wypełniaczy i zastosowanie właściwego nacisku prasowania można było uzyskać z drobnego proszku „mostki” o wymiarach dowolnych w porównaniu z wymiarami ziarn proszku. Uzyskany w ten sposób materiał porowaty charakteryzuje się małymi oporami przepływu i dużą porowatością. Wymaga to jednak przeprowadzenia poważnych prac technologicznych mających na celu zapewnienie niezbędnej wytrzymałości mechanicznej. Tworzenie

się „mostków” powoduje zmniejszenie kontaktu między cząstkami, wpływając osłabiająco na wkład, natomiast „konstrukcja przestrzenna” wkładu filtrującego może wpływać, przy spełnieniu pewnych warunków rozmieszczenia ziarn proszku, na znaczne wzmocnienie wkładu, a przez to na polepszenie parametrów wytrzymałościowych. Nie mniej jednak opracowanie takiego zagadnienia w powiązaniu z oddziaływaniami hydrodynamicznymi jest i teoretycznie i praktycznie bardzo trudne. Stąd wypływa wniosek, że przy wyborze kształtu ziarn proszku wyjściowego, przy dyspono-



Rys. 2.26. Sposoby ułożenia kul o jednakowej średnicy w metalowych filtrach spiekanych: a) ułożenie sześciennie, b) ułożenie trygonalne romboedryczne, c) ułożenie podwójne trygonalne romboedryczne, d) ułożenie oktaedryczne, e) przestrzenny elementarny wycinek materiału porowatego przy prawidłowym ułożeniu kulek

waniu tradycyjną technologią, należy wybrać proszek o kulistych kształtach ziarn.

Rozpatrywanie wytrzymałości wkładów spiekanych można sprowadzić do analizy ilości i trwałości kontaktów między ziarnami proszku. W przypadku proszku kulistego o jednakowych wymiarach ziarn liczba kontaktów między ziarnami (kulkami) zależy od sposobu ich ułożenia w przestrzeni. Na rys. 2.26 pokazano elementy różnych sposobów ułożenia kulek. Rozpatrzmy różne typy regularnych ułożeń kulek w warstwie elementu filtrującego. W tym celu określimy geometrię przestrzennego elementu regularnego ułożenia warstwy kulek (rys. 2.26e).

Porowatość całkowitą takiego elementu obliczymy ze wzoru

$$U = \frac{V_1 - V_2}{V_1} = 1 - \frac{\pi}{6} \frac{1}{\sin \alpha \sin \gamma} \quad (2.7)$$

gdzie: V_1 — objętość elementu przestrzennego, V_2 — objętość całkowita kulek zawartych wewnątrz elementu przestrzennego, d — kąt pomiędzy krawędziami podstawy elementu przestrzennego, γ — kąt między krawędziami w pionowej płaszczyźnie diagonalnej.

Dla kątów $\alpha = 60$ i 90° otrzymujemy dwa typy ułożeń: sześcienną i tetraoktaedryczną. Przy innych kątach γ otrzymujemy inne typy ułożeń.

Przy ułożeniu tzw. sześciennym liczba punktów styku kulek w elementarnej objętości wynosi 6, przy porowatości 47,6%. Przy ułożeniu trygonalnym (romboedrycznym) i podwójnie trygonalnym mamy odpowiednio liczbę punktów styku 8 i 10, a porowatość w zakresie od 39,4 (30,2) do 47,6%. Największa liczba punktów styku kulek występuje przy ułożeniu tetraoktaedrycznym i oktaedrycznym, bo wynosi 12, ale przy porowatości już tylko 25,9% (do 47,6%). Ze względu na tak dużą liczbę punktów styku praktycznie w zakresie od 6 do 12 jest możliwe uzyskanie wysokiej wytrzymałości mechanicznej i dokładności oczyszczania uzależnionej tylko od średnic kulek, a zatem jest możliwa konstrukcja wkładu o dość małej grubości. Nie mniej jednak przy niedopracowaniu technologicznym istnieje prawdopodobieństwo wypadania niektórych kulek z powierzchni wkładu ze względu na zmniejszenie liczby punktów styku, która może wynosić dla takiej kulki od 1 do 6. W przypadku proszku niekulistego również jest możliwe wypadanie granulek ponieważ, jak wykazały obserwacje takich filtrów liczba punktów styku jest przypadkowa i w zależności od kształtu ziarna oraz sposobu jego usytuowania wynosi od 1 do 15. Wpływa to wyraźnie na dużą niejednorodność własności mechanicznych, i chociaż niejednokrotnie wytrzymałość takich wkładów w niektórych miejscach jest większa to i tak w pracy filtru decyduje najsłabsze „ogniwo”. Może to doprowadzić do lokalnych ugięć, a na-

Tablica 2.2. Nominalne wymiary porów filtrów wykonanych z proszku kulistego dla frakcji od $d_1 +$ do $d_2 -$

Frakcja proszku mm $d_1 + ; d_2 -$	Wymiar porów y dla różnych sposobów ułożenia kulek w zakresie frakcji, μm							$\frac{d_2}{d_1}$	$\frac{y_{max}}{y_{min}}$	Zakres wymiarów porów, μm (praktycznie)
	a	b	c	d	e	f	g			
0,04+ ; 0,063-	6,1	7	8,0	9,6	16,8	20	25	1,57	4,3	5+ ; 25-
0,063+ ; 0,10-	9,6	11	12,6	15,3	25,2	31	42	1,58	4,3	9+ ; 40-
0,10+ ; 0,20-	15,3	19	23,5	30,6	42,0	58	84	2,00	5,5	15+ ; 80-
0,20+ ; 0,30-	30,6	34	40,0	45,9	84,0	98	126	1,50	4,1	30+ ; 125-
0,30+ ; 0,40-	45,9	50	57,0	61,2	126	135	168	1,33	3,6	45+ ; 150-
0,40+ ; 0,60-	61,2	68	80,0	91,8	168	196	252	1,50	4,1	60+ ; 250-

a — ułożenie trzech kulek d_1 , stykających się w jednym punkcie z każdą z pozostałych.

b — ułożenie dwu kulek d_1 i jednej kulki d_2 .

c — ułożenie dwu kulek d_2 i jednej kulki d_1 .

d — ułożenie trzech kulek d_2 .

e — ułożenie czterech kulek d_1 , mających po jednym punkcie styku z dwoma innymi w jednej płaszczyźnie.

f — ułożenie dwu kulek d_1 , stykających się z dwiema stykającymi się kulkami d_2 w jednej płaszczyźnie tak, że każda kulka styka się z d_1 i d_2 .

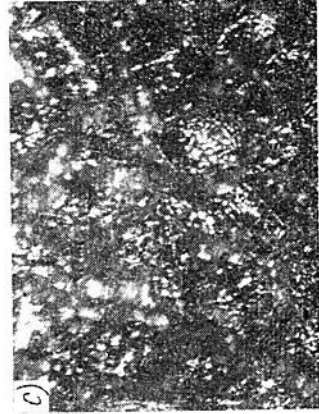
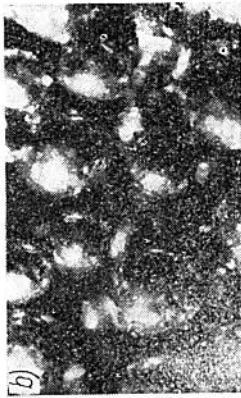
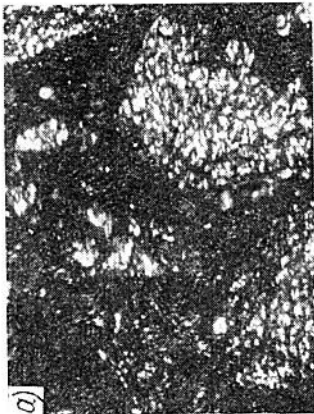
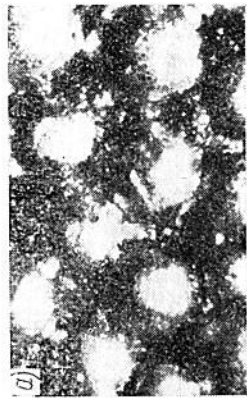
g — ułożenie czterech kulek d_2 , jak w p. e .

wet pęknięć, co oczywiście prowadzi do pogorszenia kompleksowej charakterystyki odfiltrowania lub przedostania się kawałków wykruszonego wkładu do objętości za filtrem. Kształt ziarn wpływa na przebieg charakterystyki przepływowej. Nachylenie zależności, jednostkowe natężenie przepływu przez filtr i spadek ciśnienia na przegrodzie, będą odwrotnie proporcjonalne do kwadratu współczynnika kształtu ziarna, który wynosi 1 dla proszku kulistego oraz od 1,1 do 3,5 dla proszku niekulistego (określony doświadczalnie).

Wymiary kulek wpływają na wymiary porów. W tabl. 2.2 podano średnice porów wpisanych w przekroje utworzone przez stykające się kulki proszku w zakresie frakcji od d_1+ do d_2- oraz praktycznie uzyskiwany zakres wymiarów porów. Z podanych liczb wynika, że szczególnie w przypadku filtrów dokładnego oczyszczania, należy zawęzić wymiary frakcji proszku w celu zawężenia zakresu wymiarów porów. Praktycznie efektywność filtrowania cieczy nie jest taka jak wynikałoby to z wymiarów porów. Istnieje w zasadzie duża zgodność między wielkością porów a wymiarami zanieczyszczeń, jakie są zatrzymywane przez filtr, jedynie w przypadku kulek o wymiarach od 0,20 do 0,30 mm. Zagadnienie to wiąże się z prawdopodobieństwem ułożenia zanieczyszczenia, którego kształt na ogół różni się od kształtu kulistego. Przy przepływie laminarnym cieczy, szczególnie przy małych prędkościach przepływu przez pory o wymiarach rzędu kilku do kilkunastu mikrometrów następuje w większości zatrzymywanie cząstek w zakresie równym w przybliżeniu 0,1 (d_1+ ; d_2-). Jeśli uwzględnimy chropowatość powierzchni proszku, to praktycznie otrzymamy lepszą dokładność filtrowania niż wynikałoby to z wymiarów porów. Ponadto istotny jest tu również rozkład wymiarów kulek w danej frakcji. Oczywiście im mniej jest kulek większych tym jest mniejsze prawdopodobieństwo najbardziej niekorzystnego ułożenia się kulek. W zależności od przyjętych parametrów poszczególnych operacji technologicznych praktycznie mamy prawie zawsze do czynienia ze zmniejszeniem wymiarów porów w porównaniu z wymiarami podanymi w tablicy obliczonymi dla przypadków idealnych. Przy wykonywaniu filtrów z proszku kulistego podczas spiekania ciśnienie nie powinno być większe od wynikającego z warunków spiekania. Zbyt wysokie ciśnienie powoduje deformacje kulek i na ogół zmniejszenie porowatości wkładu filtracyjnego.

2.4.3. Struktura metalowych tworzyw spiekanych i budowa wkładów filtracyjnych

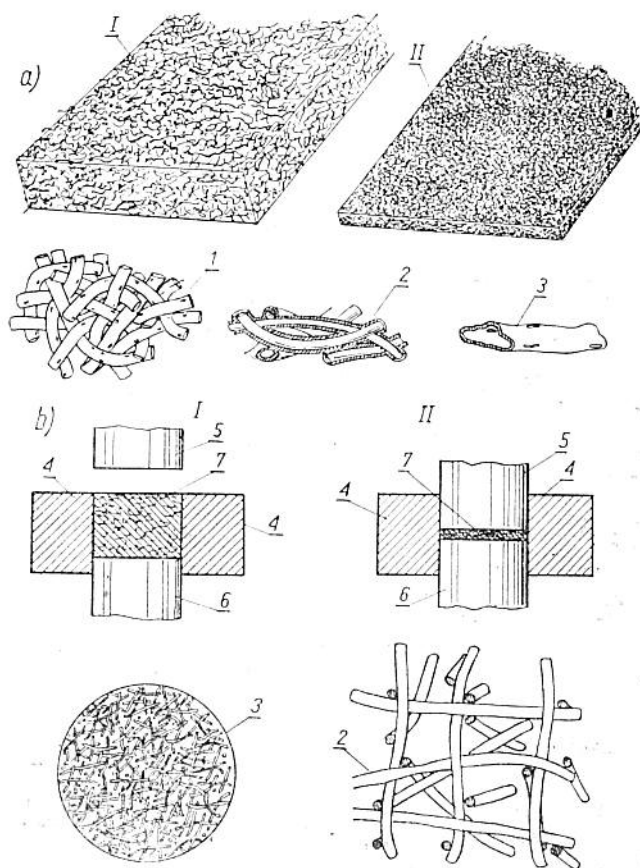
Proces technologiczny wpływa w istotny sposób na własności porowatych wkładów filtracyjnych. Omówiono już ważniejsze cechy materiałów porowatych z kulek spiekanych. W przypadku ta-



Rys. 2.28. Mikrostruktura zglądów materiałów porowatych składających się z niekullistych granulek miedzi o różnych frakcjach wymiarowych: a) $0,4 \div 0,5$ mm, b) $0,3 \div 0,4$ mm, c) $0,2 \div 0,3$ mm, d) $0,1 \div 0,2$ mm

Rys. 2.27. Mikrostruktura filtrów spiekanych z kulek brązu o różnych frakcjach wymiarowych: a) $0,3 \div 0,4$ mm, b) $0,25 \div 0,30$ mm, c) $0,10 \div 0,15$ mm

kich wyrobów o wymiarach porów decyduje przede wszystkim wymiar kulek. Na rys. 2.27 pokazano przykłady mikrostruktury powierzchni filtrów wykonanych z kulistego proszku brązu, a na rys. 2.28 mikrostruktury filtrów z proszku niekulistego miedzi.



Rys. 2.29. Tworzenie struktury porowatej z włókien metalowych: a) rurkowych, b) drutowych; I — faza wstępna, II — faza prasowania, 1 — widok fragmentu tworzywa, 2 — przekrój przez zespół włókien, 3 — fragment włókna rurkowego, 4 — matryca, 5, 6 — stempel górny i dolny, 7 — włókna drutowe

Oprócz wykorzystania ziarn w budowie filtrów spiekanych stosuje się również metalowe włókna o różnych kształtach wyjściowych. Na rys. 2.29 pokazano dwa przykłady tworzenia porowatej struktury z włókien rurkowych (Fram Corp.) oraz włókien drutowych

wych (Armour Research Found of IIT). Wymiary ziarn wyjściowych i proces technologiczny określają wymiary porów, a zatem wymiary filtrowanych cząstek i własności przepływowe. Materiały porowate spiekane charakteryzuje się najczęściej przez podanie gradacji będącej umownym symbolem materiału oraz podstawowych parametrów filtracyjnych i przepływowych. W tabl. 2.3 po-

Tablica 2.3. Przykładowe zestawienie podstawowych parametrów materiałów spiekanych z kulek brązu

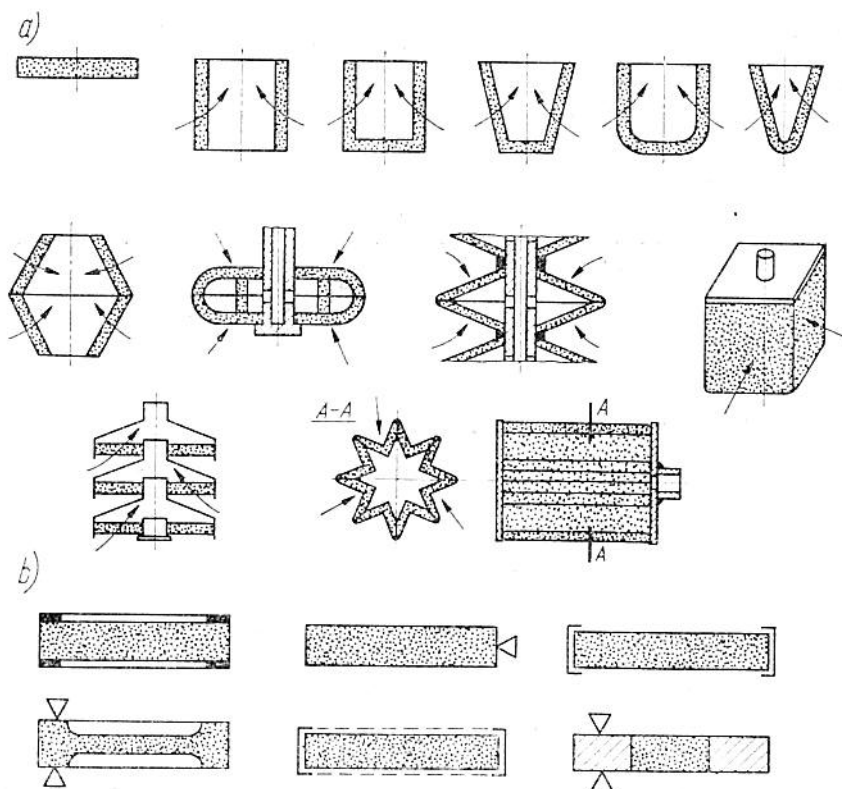
Wielkość filtrowanych cząstek μm	Przepuszczalność Darcy 10^{-8} cm^2	Grubość filtru mm	Natężenie przepływu wody przy $0,7 \text{ kg/cm}^2$ w $1/(\text{min cm}^2)$
> 80-100	150	4,0	15,30
> 55-65	90	3,5	10,5
> 30-40	30	3,0	4,0
> 15-20	7	2,5	1,13
> 9-12	2,5	2,0	0,51
> 5-7	1,0	1,5	0,27
> 1-3	0,3	1,0	0,15

dano przykład określania podstawowych parametrów materiałów filtracyjnych z kulek brązu produkowanych przez firmę Bound Brook (Anglia), a w tablicy 2.4 — przez firmę Parker Pen Co (USA).

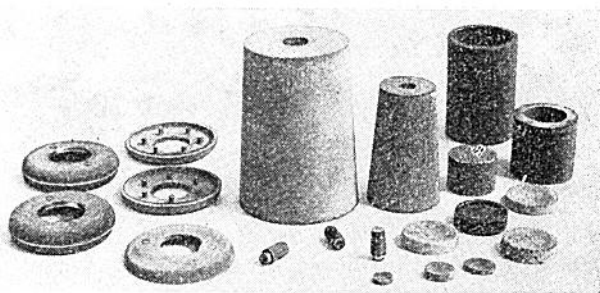
Tablica 2.4. Przykładowe zestawienie własności filtracyjnych materiałów spiekanych ze stali nierdzewnej

Wielkość filtrowanych cząstek μm	Średni wymiar porów μm
50-135	150
25-68	75
15-40	50
10-27	30
4-11	10
2-5	5

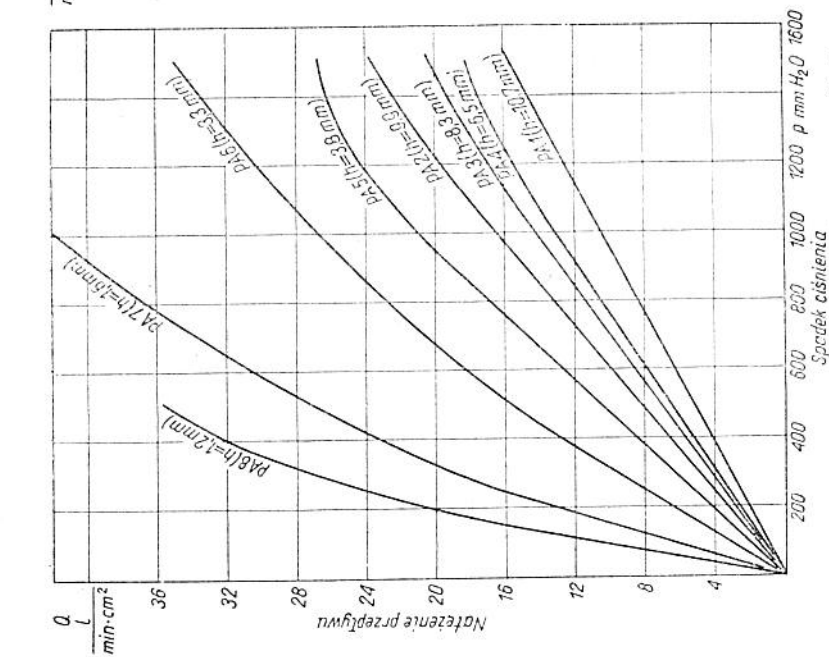
W zależności od zastosowania wykonuje się metalowe filtry spiekane o kształtach gotowych do użycia, bądź też kształtuje się je z mniejszych elementów przez lutowanie, zgrzewanie, wtlaczanie lub też stosując inne operacje. Przy wyborze kształtów elementów filtracyjnych, szczególnie w przypadku dużych natężeń przepływów — dąży się do skupienia dużej powierzchni filtracyj-



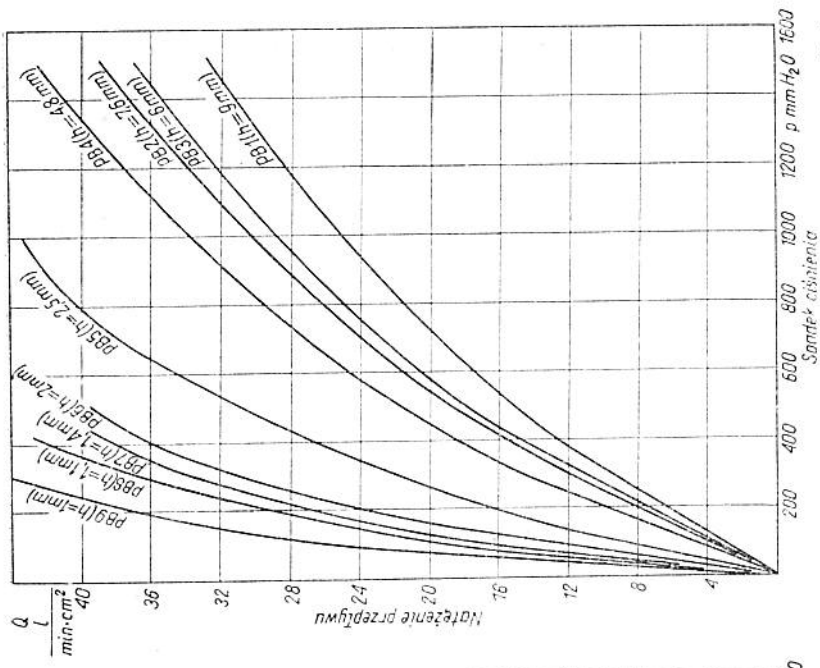
Rys. 2.30. Najczęściej wykorzystywane: a) kształty spiekanych elementów filtracyjnych, b) sposoby zamocowania płaskich wkładów



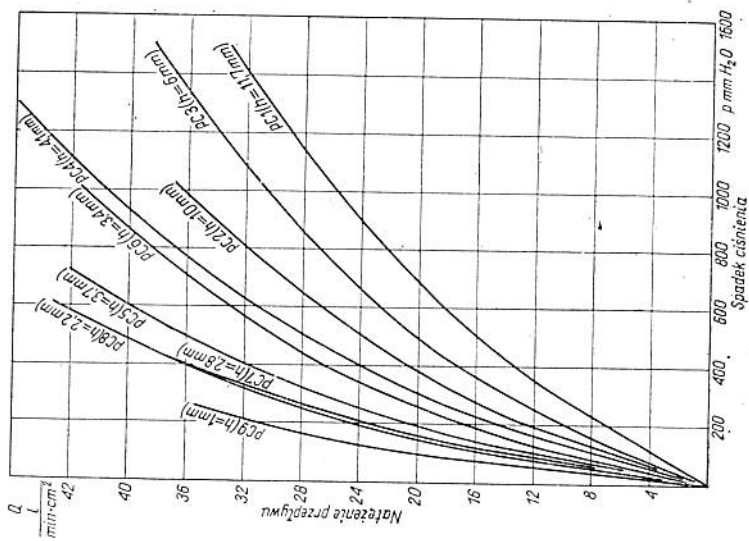
Rys. 2.31. Przykładowy zestaw metalowych filtrów spiekanych o różnych kształtach



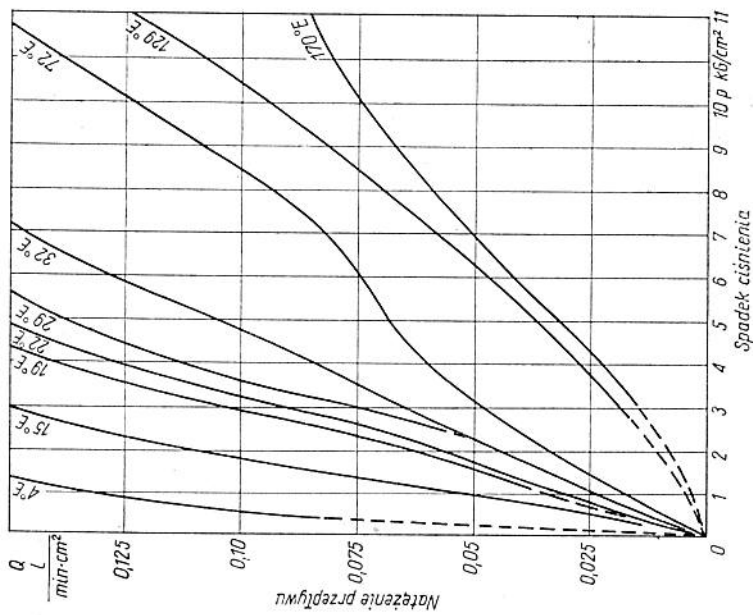
Rys. 2.32. Charakterystyki $Q = f(p)$ dla grupy próbek metalowych filtrów kulkowych o symbolach od PA1 do PA8 ($d_k = 0,1 \div 0,2$ mm), o różnej grubości h .



Rys. 2.33. Charakterystyki $Q = f(p)$ dla grupy próbek metalowych filtrów kulkowych o symbolach od PB1 do PB9 ($d_k = 0,2 \div 0,3$ mm), o różnej grubości h .



Rys. 2.34. Charakterystyki $Q = f(p)$ dla grupy próbek metalowych filtrów kulkowych o symbolach od PC1 do PC9 ($d_k = 0,25 \div 0,35$ mm), o różnej grubości h



Rys. 2.35. Charakterystyki hydrauliczne metalowych filtrów spiekanych o dokładności filtrowania ok. 15 μ m

nej w małej objętości. Stąd też w użyciu są zestawy filtracyjne typu talerzowego oraz gwiazdowego.

Najczęściej spotykane kształty spiekanych elementów filtracyjnych pokazano na rys. 2.30, a możliwości wykonania różnych kształtów metalowych filtrów spiekanych na rys. 2.31.

Na rys. 2.32, 2.33 i 2.34 zestawiono przykładowe charakterystyki przepływu powietrza przez metalowe filtry o różnej grubości wykonane z kulek. Jak widać na rysunkach występuje znaczny rozrzut charakterystyk, które nie we wszystkich przypadkach układają się zgodnie z przewidywanymi przebiegami w miarę zmian grubości materiału. Wiąże się to ze zmianą porowatości uwarunkowanej względami technologicznymi.

Przykładowe przebiegi charakterystyk hydraulicznych przy dużych spadkach ciśnień i dużej lepkości cieczy roboczej, materiału wykonanego z kulistego proszku brązu, o wymiarach porów do 16 μm , pokazano na rys. 2.35.

2.5. Sita filtracyjne

Sitami filtracyjnymi nazywa się materiał porowaty o specjalnych własnościach służący do filtrowania płynów oraz przesiewania i oddzielania płynów wielofazowych, zaś *siatkami filtracyjnymi* — przegrody lub zasłony zabezpieczające. W budowie filtrów używa się obu terminów uważając je za równoważne.

Ze względu na obszerną literaturę dotyczącą opisu podstawowych własności sit, w ustępie tym omówione będą tylko niektóre z nich ze szczególnym zwróceniem uwagi na budowę sit filtracyjnych metalowych oraz z tworzyw sztucznych.

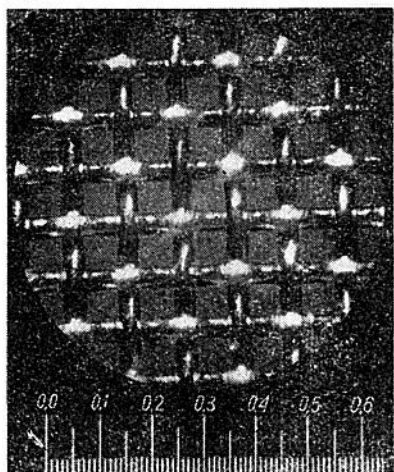
W budowie sit filtracyjnych są stosowane następujące materiały: metale i stopy jak brąz cynowo-fosforowy (6÷7% Sn, 0,3÷0,4% P, reszta Cu), tombak, miedź, nikiel, brąz, wolfram, molibden, monel i inne, oraz tworzywa sztuczne (nylon, dederon, perlon, saran i inne).

Rodzaje splotu (tylko sit tkanych): splot prosty (gładki), splot szarżowy (diagonalny), oczka kwadratowe lub prostokątne i sploty specjalne.

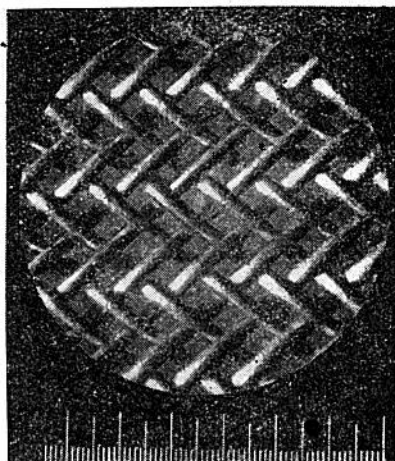
Wymiary sit tkanych; numer siatki o oczkach kwadratowych określa wymiar przelotu oczka w mm (siatka milimetrowa), numer



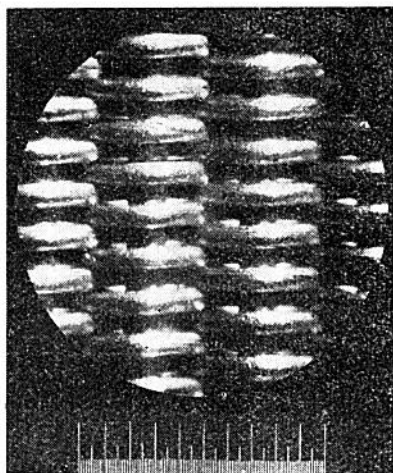
Rys. 2.36. Profile podstawowe drutów wykorzystywane w budowie sit filtracyjnych



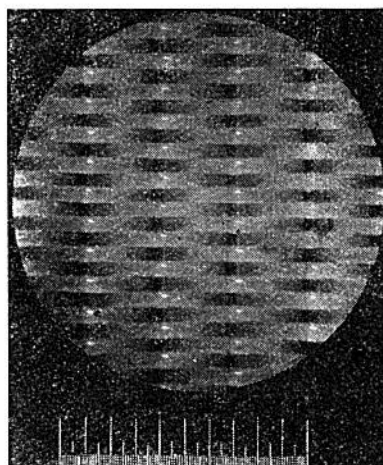
Rys. 2.37. Mikrofotografia sita o splotcie prostym (SnBz6, MW063, NRD); działka elementarna wynosi 0,01 mm



Rys. 2.38. Mikrofotografia sita o splotcie szarżowym symetrycznym (0,04, ZSRR)



Rys. 2.39. Mikrofotografia sita o oczkach (nr 60/320)



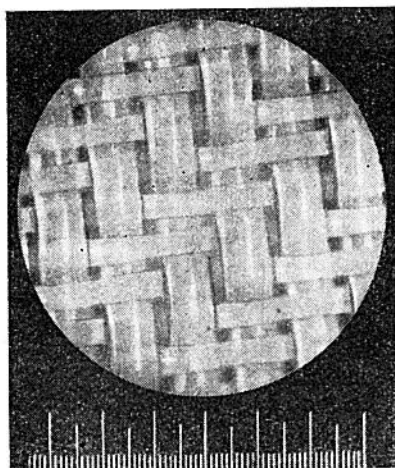
Rys. 2.40. Mikrofotografia sita bezoczkowego (nr 85, NRD) wykonanego ze stali (osnowa) i dederonu (wątek)

siatki pojedynczej — liczbę drutów osnowy na 1 cm długości siatki systemu metrycznego lub na 1 cal angielski (25,4 mm) siatki calowej albo numer siatki podwójnej — liczbę oczek na cal niemiecki (= 26 mm) do numeru 100 lub na cal francuski (= 27 mm) powyżej numeru 100. Stosowane w określeniach liczby drutów lub oczek na 1 cal mogą spowodować błędne oceny ze względu na używanie różnych wymiarów cala: japońskiego (= 30,3 mm), szwajcarskiego (= 30 mm), szwedzkiego (= 29,69 mm), paryskiego (= 28 mm), francuskiego II (= 28,78 mm), belgijskiego (= 27,07 mm), austriackiego (= 26,34 mm), duńskiego (= 26,16 mm), bawarskiego (= 24,36 mm) i innych.

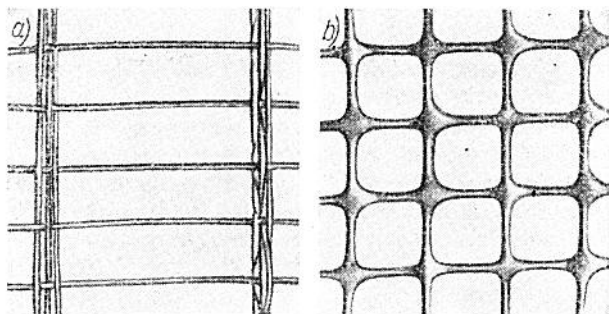
Do oznaczenia numerów sit filtracyjnych o splocie szarżowym, zwanym też splotem diagonalnym lub rypсовym, albo też o oczkach krytych używa się liczb ułamkowych: licznik określa liczbę drutów (nici) osnowy na 1 cal angielski (lub 1 cm), a mianownik — liczbę drutów (nici) wątku na 1 cal angielski (lub 1 cm).

Ze względu na sposób wykonania siatki rozróżnia się sita tkane, plecione, spiekane, zgrzewane, skręcane, wiązane, przecinane, składane (szczelinowe).

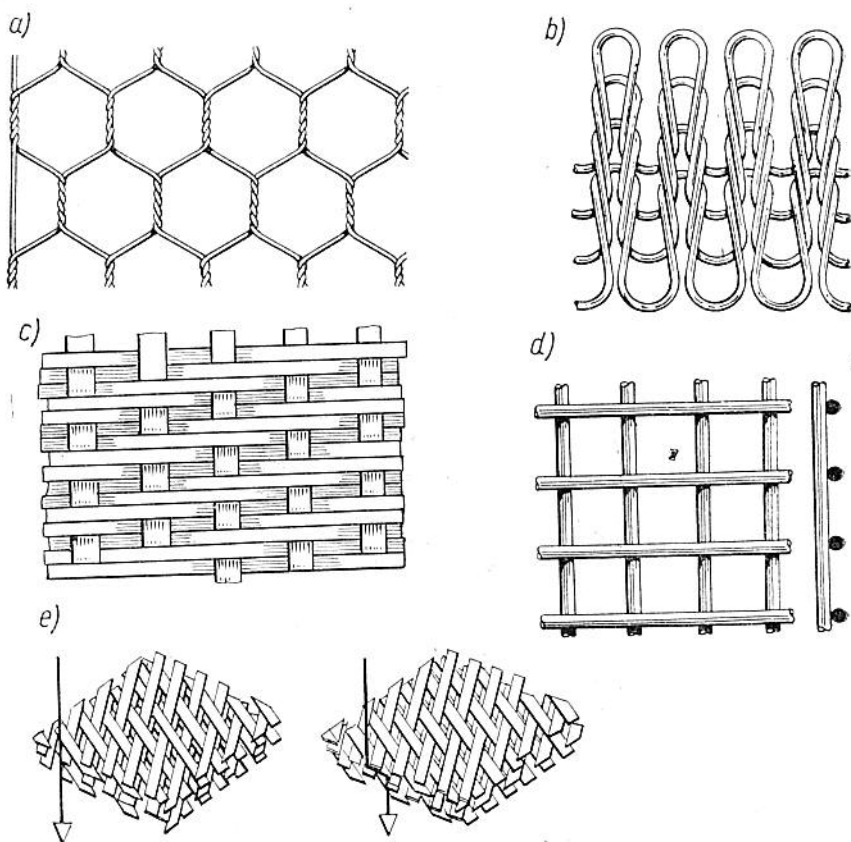
Dla sit tkanych wykorzystuje się druty o różnych profilach (rys. 2.36). Widok sita tkanego z drutu o przekroju okrągłym i splocie prostym przedstawiono na rys. 2.37. Sita tkane filtracyjne mają na ogół splot szarżowy. Na rys. 2.38 pokazano splot szarżowy symetryczny na przykładzie sita 40 μm . Duże rozpowszechnienie znalazły w budowie wkładów filtracyjnych dwie odmiany splotu szarżowego. Pierwsza odmiana charakteryzuje się różnymi średnicami osnowy i wątku, przy czym druty osnowy ma-



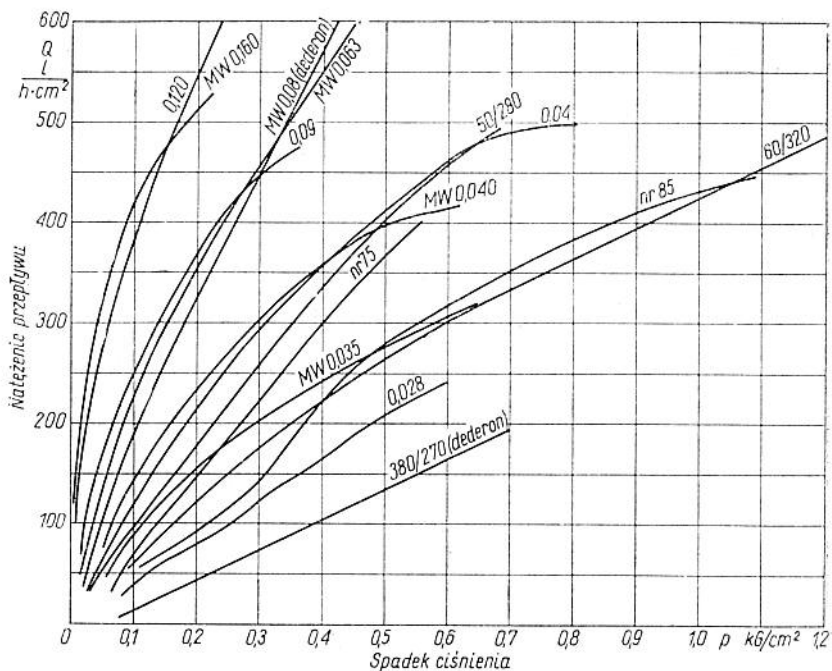
Rys. 2.41. Mikrofotografia sita dederonowego (nr 380/270, NRD)



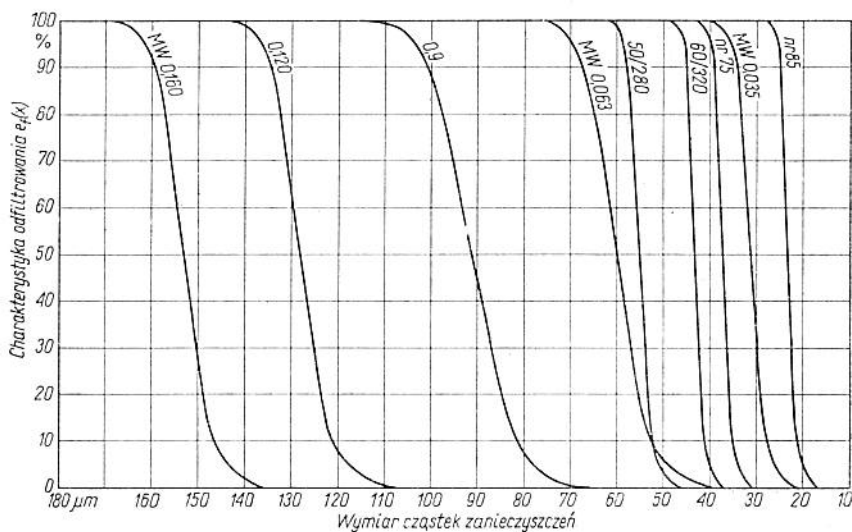
Rys. 2.42. Widok sit specjalnej budowy: a) o splocie potrójnym prostym, b) o oczkach kwadratowych z lutowanymi złączami



Rys. 2.43. Różne odmiany sit stosowanych w budowie filtrów: a) siatka podporowa filtrów skręcana, b) siatka splatana, c) sito jednostronne o splocie szarżowym, d) sito zgrzewane, e) sito Poroloy T powyżej $75 \mu\text{m}$ i „Zig-Zag” dla $2 \div 75 \mu\text{m}$



Rys. 2.44. Zestawienie charakterystyk hydraulicznych sit filtracyjnych; lepkość kinematyczna cieczy roboczej 20 ± 2 cSt, lepkość dynamiczna 18 ± 2 cP, ciśnienie atmosferyczne 760 ± 20 mm Hg

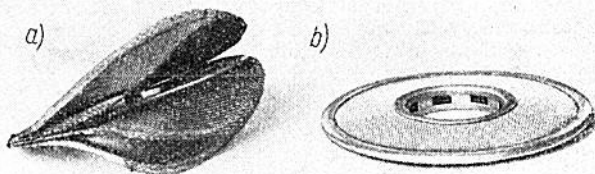


Rys. 2.45. Zestawienie przykładowe charakterystyk oddfiltrowania sit filtracyjnych

ją większe średnice i znajdują się w pewnej od siebie odległości, natomiast druty wątku mają mniejsze średnice i są tkane jedne obok drugiego. Są one nazywane *sitami bezoczkowymi* (rys. 2.39) lub *sitami o oczkach krytych*. Podobną budowę ma sito filtracyjne przedstawione na rys. 2.40. Druga odmiana polega na zastosowaniu w osnowie lub wątku drutów albo nici różnego przekroju bądź też linek skręcanych z kilku włókien. Taka budowa reprezentuje sito dederonowe (NRD) nr 380/270 (rys. 2.41). Sita specjalnej budowy pokazano na rys. 2.42 oraz różne odmiany takich sit na rys. 2.43. Do budowy wkładów filtracyjnych dokładnego oczyszczania cieczy stosuje się najczęściej sita jednostronne o splocie szarżowym (12 μm) oraz sita Poroloy T (od 2 μm wzwyż).

Sita filtracyjne charakteryzują się na ogół małymi oporami przepływu. Przykładowe zestawienie charakterystyk hydraulicznych wybranych sit filtracyjnych podano na rys. 2.44 oraz przebiegi charakterystyk odfiltrowania tych sit na rys. 2.45.

Ze względu na znaczną podatność sit filtracyjnych do odkształceń, buduje się wkłady w taki sposób, aby powierzchnia oddziaływania przepływającego płynu na sito filtracyjne była możliwie najmniejsza lub też stosuje się podpory rusztowe oraz sita o dużej wytrzymałości mechanicznej. Doskonałą budowę ma segment siatkowego wkładu filtracyjnego pokazany na rys. 2.46,



Rys. 2.46. Budowa segmentu siatkowego wkładu filtracyjnego: a) widok częściowo rozmontowanego segmentu wkładu, b) widok ogólny segmentu

w którym zamocowanie obrzeży wycinków sita następuje przez zacisk pierścieni aluminiowych na zewnętrznej i wewnętrznej średnicy. Sito filtracyjne jest położone na siatce o dużej wytrzymałości mechanicznej i karkasie z tworzywa.

2.6. Syntetyczne tworzywa porowate

Budowę porowatą ma wiele tworzyw naturalnych stosowanych w procesach filtrowania, np. bibuła filtracyjna, wszelkiego rodzaju tkaniny filtracyjne itp. Jednak niewielkie możliwości mo-

dyfikacji wymiarów porów ograniczają zastosowanie ich do stosunkowo niewielkiej grupy procesów filtracyjnych. Natomiast stosowanie materiałów porowatych granulkowych zapewnia uzyskanie bardzo dobrych efektów szczególnie przy dobieraniu wielkości porów do wymiarów cząstek, które należy usunąć z cieczy filtrowanej. Do innych zalet tworzyw porowatych należą: 1) wysoka odporność na oleje, smary, większość rozpuszczalników organicznych itp.; 2) odporność na działanie wody oraz warunki atmosferyczne; 3) dobre właściwości izolacyjne (elektryczne i cieplne). Dobór odpowiedniego materiału porowatego zapewnia uzyskanie dobrych efektów filtracyjnych. Ze znanych tworzyw porowatych najbardziej nadaje się do tego celu polichlorek winylu. Zaletami jego są: dostępność na rynku i stosunkowo niska cena, odporność na oleje, odporność na wodę itp.

Surowcem do otrzymywania porowatego PCW jest polimer chlorku winylu. Do otrzymywania miękkiego PCW o otwartych porach, firma ICI zaleca stosowanie np. polimeru o nazwie Corwic P65/49/11. Innymi surowcami służącymi do wytwarzania porowatego PCW są zmiękczacze, których ilość dochodzi często do 100 i więcej procent wagi polimeru. Do najczęściej stosowanych zmiękczaczy należą ftalany: etyloheksyloxy, butyloxy i oktyloxy oraz fosforany — trójkrezyloxy, oktylowodwufenyloxy i trójtlotylowy. W celu stabilizowania PCW dodaje się niewielkich ilości stabilizatora. Stabilizatorami są głównie krzemiany, węglany i stearyniany ołowiu, kadmu, baru i organiczne związki cyny.

Czynnikami porotwórczymi w tworzywach są różnego typu porofory: dwunitryl kwasu azoizomasłowego, N,N'-dwumetylo-N,N'-dwunitrozotereftalamid, szczawian mocznika, woda utleniona i inne. Ilości dodawanych poroforów są stosunkowo duże, wynoszą bowiem do kilkunastu procent. Wymienione surowce są surowcami podstawowymi, oprócz nich w skład kompozycji do ekspandowania wchodzi pigmenty, emulgatory oraz napełniacze.

Istnieje kilka głównych metod otrzymywania porowatego polichlorku winylu. Różnica między nimi polega przede wszystkim na rodzaju poroforów oraz wielkości ciśnienia. W zależności od wielkości ciśnienia otrzymuje się porowate tworzywo typu kanalikowego lub komórkowego. Najważniejsze są metody: niskociśnieniowa i bezciśnieniowa.

Metoda niskociśnieniowa. Otrzymanie miękkiego porowatego PCW odbywa się w jednym etapie produkcyjnym przy nadciśnieniu do 5÷6 at. Tworzywo otrzymane przy zastosowaniu tej metody ma większość porów otwartych. Metoda ta jednak nie nadaje się do otrzymywania folii na elementy filtrujące.

Metoda bezciśnieniowa. Istota tej metody polega na porowaniu PCW pod normalnym ciśnieniem z równocześnie przebiegającym

żelowaniem. Przy zastosowaniu tej metody otrzymuje się miękkie PCW o otwartych porach. Najczęściej stosowanymi w tej metodzie są porofor BL353, porofor D33 i gazy obojętne. Sposób wykorzystujący Porofor BL 353 został opracowany przez ICI. Początkowo otrzymuje się pastę, w skład której wchodzi PCW, stabilizator, zmiękcacz, porofor i inne składniki. Pastę umieszcza się w formie i ogrzewa. Ogrzewanie może przebiegać w dwojaki sposób: pierwszy z nich polega na ogrzaniu pasty do temperatury 100°C w ciągu 30 min, w celu rozłożenia poroforu i nadania PCW struktury porowatej. Właściwe żelowanie następuje przy ogrzaniu do temperatury 160°C w ciągu następnych 30 min. Drugim sposobem porowania jest ogrzewanie pasty w temperaturze 160°C w ciągu 30 min. Porowanie i żelowanie zachodzą wówczas jednocześnie.

Bezcisnieniowe metody otrzymywania porowatego PCW za pomocą wody utlenionej oraz w obecności wody utlenionej i dwuizocyanianu toluilenu są opisane w patentach.

Inne metody otrzymywania. Oprócz wymienionych uprzednio metod wytwarzania porowatego PCW, można go również otrzymywać cząstek o średnicy większej od 0,001 mm, przepuszczając wanę mieszaninę PCW lub jej kopolimeru z octanem winylu i innymi dodatkami poddaje się spiekaniu w polu elektrycznym wysokiej częstotliwości pod małym ciśnieniem.

Do produkcji porowatego PCW nadaje się metoda polegająca na wymywaniu substancji rozpuszczalnych; skrobi, siarczanu amonowego itp. Materiał porowaty otrzymany za pomocą skrobi ma jednorodną, mikroporowatą strukturę o otwartych porach. Tworzywo to znane pod nazwą „Standard-Porwic” ma zdolność zatrzymywania cząstek o średnicy większej od 0,001 mm, przepuszczając gazy i ciecze.

Możliwe jest też porowanie PCW za pomocą metalicznego glinu i magnezu oraz roztworu 15÷20% ługu sodowego. Z powyższych rozważań wynika, że najbardziej odpowiednią metodą otrzymywania porowatego polichlorku winylu do budowy filtrów jest metoda wymywania rozpuszczalnych soli ze żelowanego PCW. Wielkość porów zależy będzie od wielkości cząstek użytej soli, co może być regulowane przez zmielenie i przesianie soli na odpowiednich sitach.

W tabl. 2.5 podano ważniejsze handlowe lub firmowe nazwy tworzyw syntetycznych otrzymanych przy zastosowaniu różnych metod (tkanych i włóknistych), stosowanych w technice filtrowania cieczy i gazów. Brak dostatecznych danych dotyczących stosowania przedstawionych tworzyw w filtrach cieczy hydraulicznych uniemożliwił dokonania wyboru najbardziej odpowiednich tworzyw dla zastosowań w warunkach krajowych. W tablicy wyodrębniono grupy tworzyw syntetycznych, których własności są na ogół znane.

Tablica 2.5. Handlowe lub firmowe nazwy tworzyw syntetycznych (tkanych i włóknistych) używane w technice filtrowania

Kraj	Poliamidowe	Poliestrowe	Poliakrylonitrylowe	Polichlorowinyłowe	Pochodne alkoholu poliwinylowego
ZSRR	Kapron Enant		Nitrilon	Chlorin Vinitron	Vinol
USA	Caprolan Nylon 66 Nylon 11	Dacron Vycron Amilar Fortrel	Nitron Orlon Acrilan Zefran Creslan	Vinyon Saran Bexan	Vinyl Elvanol
NRD	Dederon	Lanon	Wolorylon Prelana	Elaston PeCe Borsten	
NRF	Perlon	Diolen	Dralon PAN	Rhovyl	Synthofil
CSSR	Silon Novodur		Nitrilon		
Anglia	Nylon Celon Nylon 66	Terylen	Courtelle	Bexan	
Japonia	Grilon Niplon	Tetoron	Exlan Nitron	Vyclon	Kralon Vinylon
Francja	Nylon Balsin Nyl-France	Tergal	Crylor	Thermovyl Isovyl Rhovydell Rhovyl	Rhodoviol
Włochy	Lilion Nylon	Terital	Crylion Velicron	Sniol Movil	
Węgry	Denulon		Panacril		
PRL	Stilon			Winipor (materiał otrzymany laboratoryjnie IAP PW)	

Mogą one być pomocą w wyborze tworzywa porowatego przeznaczonego do filtrowania cieczy roboczych, a szczególnie olejów mineralnych stosowanych w urządzeniach hydraulicznych.

Tworzywa mikroporowate o otwartych porach otrzymuje się stosując opisane poprzednio metody. Większość opracowań dotycząca tych zagadnień jest zastrzeżona patentami.

Poniżej opisano sposób wytwarzania mikroporowatego materiału filtracyjnego z polichlorku winylu Winipor. Materiał ten uzyskuje zwiększoną wytrzymałość mechaniczną, szczególnie na rozciąganie, uzyskaną przez zastosowanie równomiernej jedno- lub wielowarstwowej mikroporowatej struktury kanalików przelotowych. Kanaliki te otrzymuje się przez połączenia wielu warstw materiału porowatego za pomocą wiązań międzycząsteczkowych i przez wzmocnienie siatką metalową, połączoną z warstwą mikroporowatego polichlorku winylu siłami adhezji lub kohezji.

Większość metod otrzymywania porowatego polichlorku winylu polega na zastosowaniu poroforów lub zastosowaniu substancji, które po zżelowaniu mieszanek wymywa się z tworzywa np. wodą. Nie zapewniają one otrzymania dobrego materiału filtracyjnego, gdyż wskutek nierównomiernego rozkładu poroforu nie wszystkie kanaliki są przelotowe lub też rozrzut wielkości porów jest duży. Przy zastosowaniu wymywania substancji rozpuszczalnej czas wymywania jest długi, a zatem koszt materiału porowatego jest wysoki. Wadą wymienionych sposobów jest również mała wytrzymałość mechaniczna, co jest szczególnie niekorzystne w przypadku stosowania takich tworzyw jako materiałów filtracyjnych.

Bardziej skuteczne wytwarzanie polega na przygotowaniu mieszanki zawierającej w odpowiednich proporcjach frakcje sproszkowanej substancji wypełniającej, materiału konstrukcyjnego, soli hydrolizującej, plastyfikatora, stabilizatora, substancji smarnej, barwników oraz materiału wzmacniającego.

Do wytwarzania mikroporowatego materiału o szczególnie wysokich własnościach wytrzymałościowych stosuje się materiał wzmacniający o odpowiednio przygotowanej chemicznie powierzchni. Wyżej wymienione mieszanki nakłada się w dowolny sposób na materiał wzmacniający, utworzony np. z metalowej siatki tkanej lub spiekane go materiału porowatego. Mieszankę i materiał wzmacniający po sprasowaniu żeluje się w temperaturze 160°C lub wyższej zależnie od zastosowanego plastyfikatora, przynajmniej w ciągu pół godziny. Prasowanie samej mieszanki i sprasowanie jej z materiałem wzmacniającym przeprowadza się w temperaturze otoczenia lub wyższej, ale nie przekraczającej 130°C, natomiast żelowanie może być przeprowadzone pod naciskiem lub bez nacisku zewnętrznego. Przykładowy skład mieszanki do wytworzenia ma-

teriału filtracyjnego: 22,6% PCW, 67,8% substancji wypełniającej (skrobia i sól hydrolizująca), 9% plastyfikatora, 0,6% stabilizatora. Pory uzyskuje się przez wymycie substancji wypełniającej roztworem wodnym enzymu, np. amylazy, w temperaturze optymalnej dla danego enzymu (odpowiednie pH jest utrzymywane przez hydrolizę soli wypełniającej). Wymywanie jest prowadzone w temperaturze około 100°C, gdy jako czynnik wymywający stosuje się wodę zawierającą niewielkie ilości jonów katalizujących hydrolytyczny rozpad skrobi.

Do podstawowych zalet takiego sposobu wytwarzania należą: niski koszt składników i powszechna ich dostępność, w szczególności polichloroku winylu oraz substancji wypełniających. Wytwarzanie mikroporowatego materiału może odbywać się w warunkach nie wymagających kosztownego oprzyrządowania, przy zastosowaniu typowej aparatury chemicznej. Sposób wykonania cechuje bezpieczeństwo ze względu na niestosowanie składników toksycznych. Opisany sposób wytwarzania zawiera proste operacje technologiczne, które mogą być zautomatyzowane.

Rozdział 3. UKŁADY FILTROWANIA ORAZ RODZAJE I WYPOSAŻENIE FILTRÓW

3.1. Symbole graficzne filtrów i urządzeń pomocniczych

Symbole graficzne urządzeń składających się z wielu elementów ułatwiają znacznie prace projektowe. Symbole te są najczęściej uproszczonymi umownymi oznaczeniami elementów. Na rys. 3.1 przedstawiono zestawienie podstawowych symboli graficznych filtrów, na rys. 3.2 — przykładowe zestawy symboli graficznych filtrów uwzględniających szczegóły ich budowy, a na rys. 3.3 — symbole najczęściej spotykanych urządzeń pomocniczych filtrów.

W praktyce stosowania filtrów powietrza używa się najczęściej niewielu odmian konstrukcyjnych filtrów; są to przeważnie zestawy złożone z filtrów działających wg różnych zasad lub też zestawy filtrów złożone ze współpracujących ze sobą elementów przygotowania płynu. Najczęstszą postacią jest kombinacja zestawu filtrująco-regulująco-smarującego składającego się z filtru powietrza (ze zbiornikiem odwadniającym z zaworem spustowym otwieranym ręcznie lub wyposażonym w automat spustowy), regulatora ciśnienia (najczęściej wyposażonego w manometr) i smarownicy smoczkowej. Pełny symbol takiego zestawu przedstawiono na rys. 3.4a oraz często jeszcze stosowany uproszczony symbol graficzny tego zestawu — na rys. 3.4b.

3.2. Układy przygotowania płynu i sposoby włączenia filtrów

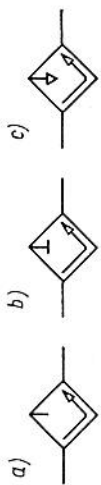


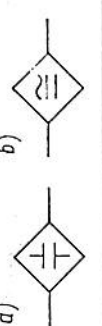
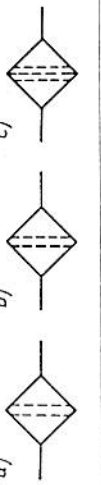
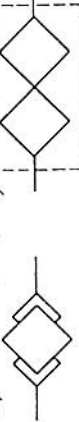
3.2.1. Instalacja pneumatyczna i układy smarowania

Stacje zasilania i filtry w układach sterowania. Właściwie przygotowany płyn roboczy powinien zapewniać uzyskanie wymaganych parametrów niezbędnych do poprawnego wypełnienia zadań stawianych urządzeniom płynowym. Oprócz wymagań związanych z uzyskaniem i podtrzymaniem założonych parametrów ciśnieniowych, przepływowych i temperaturowych należy również przede wszystkim zapewnić należyłą czystość płynu roboczego.

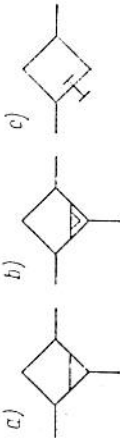
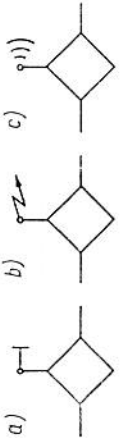
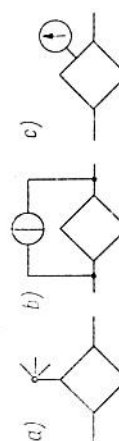
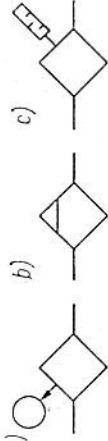
Lp.	Symbol	Nazwa	Lp.	Symbol	Nazwa
1		filtr płynu (cieczy, gazu) bez wyszczególnienia sposobu filtrowania	6		odstojnik gazowy
2		filtr z upustem części cieczy	7		filtr grawitacyjny przepływowy
3		filtr porowaty (lub energetyczny)	8		filtr plynodynamiczny
4		filtr energetyczny (oznaczenie ogólne)	9		filtr magnetyczny
5		filtr grawitacyjny	10		filtr elektryczny

Romb oznacza filtr, linie poziome – dopływ i odpływ płynu, strzałki – kierunek przepływu, zaciemnione koło w dolnym rogu rombu – upust cieczy, koło niewypelnione – upust gazu, linia pionowa – dopływ płynu nieoczyszczonego. Oznaczenie filtru porowatego stosowane jest również do filtrów energetycznych. W przypadku wyodrębnienia tych ostatnich bok rombu wewnętrzznego jest mniejszy o 15% od boku rombu zewnętrznego. Grot niewypelniony strzałki wewnątrz filtru oznacza oczyszczanie gazu, grot ciemny – oczyszczanie cieczy.

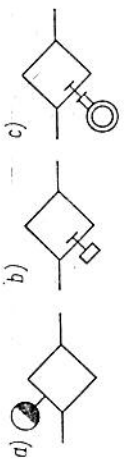
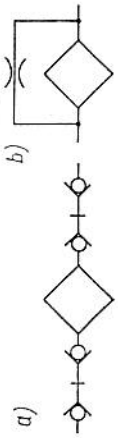
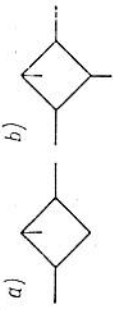
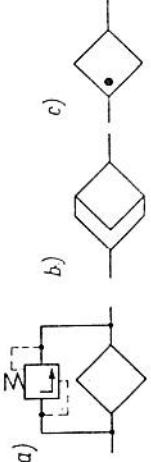
Rys. 3.1. Podstawowe symbole graficzne filtrów płynów roboczych

Lp.	Symbole	Nazwa
1		<p>filtry plynodynamiczne gazowe: a) uderzeniowe, b) z przegradą stałą, c) z przegradą ciekłą</p>
2		<p>filtry plynodynamiczne gazowe: a) odśrodkowe, b) wirówki, c) cyklony</p>
3		<p>filtry energetyczne magnetyczne: a) z magnesem trwałym, b) z elektromagnesem</p>
4		<p>filtry elektryczne: a) elektrostatyczne, b) wysokoczęstotliwościowe</p>
5		<p>filtry porowate: a) z wkładem wgiębnym, b) z wkładem o zmiennych wymiarach porów w kierunku filtrowania (zmniejszających się), c) z wkładem wielowarstwowym</p>
6		<p>filtry: a) dwukierunkowego przepływu, b) złożony z dwu wkładów połączonych równolegle</p>

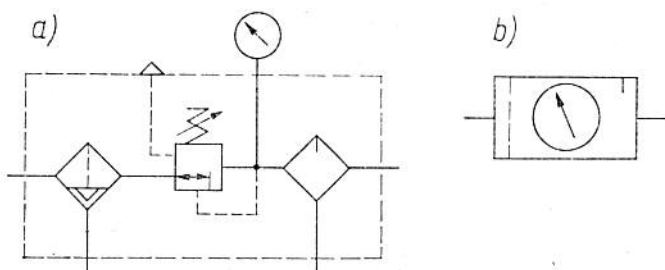
Rys. 3.2. Przykładowe symbole graficzne uwzględniające szczegóły i własności konstrukcyjne budowy filtrów

Lp.	Symbole	Nazwa
1		<p>filtry z urządzeniem oczyszczania: a) osadnika ręcznego, b) osadnika automatycznego, c) wkładu</p>
2		<p>filtry ze wskaźnikiem stanu zanieczyszczenia wkładu o wyjściu: a) mechanicznym, b) elektrycznym, c) dźwiękowym</p>
3		<p>filtry ze wskaźnikiem stanu zanieczyszczenia wkładu: a) o wyjściu świetlnym, b) ze wskaźnikiem różnicy ciśnień granicznej, c) ze wskaźnikiem różnicy ciśnień granicznej, c) ze wskaźnikiem różnicy ciśnień ciągłej (manometr różnicowy)</p>
4		<p>filtry z urządzeniem: a) odpowietrzającym, b) odwadniającym (osuszającym), c) z tłumikiem drgań</p>

Rys. 3.3. Symbole graficzne urządzeń pomocniczych filtrów

Lp.	Symole	Nazwa
5		<p>filtry: a) ze wskaźnikiem wilgotności, b) z urządzeniem ręcznego oczyszczania wkładu, c) z oczyszczaniem wkładu przy użyciu silnika elektrycznego</p>
6		<p>filtry: a) wyposażony w złącze szybkorozłączalne z zaworami zwrotnymi otwieranymi mechanicznie, b) proporcjonalny</p>
7		<p>Smarownice: a) smoczkowa, b) z regulacją ręczną ilości oleju</p>
8		<p>filtry: a) z zaworem różnicowym, b) z wkładem chemicznie oczyszczającym, c) sterylizujący</p>

Rys. 3.3. cd.

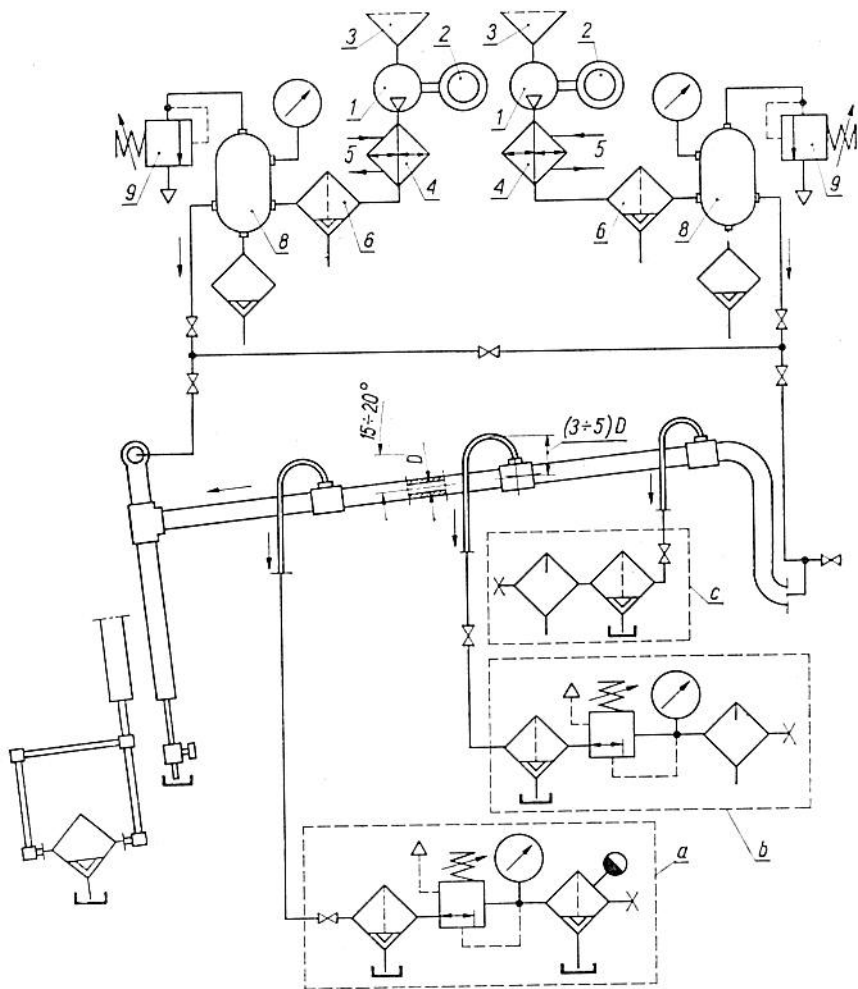


Rys. 3.4. Symbole graficzne zestawu filtrująco-regulująco-smarującego powietrza: a) pełny symbol, b) uproszczony symbol

Jest to zasadniczy problem ze względu na różnorodność zastosowań płynu z jednej strony i możliwości realizacyjne źródeł zasilania z drugiej strony. Przyjmuje się najczęściej, że urządzenia pneumatyczne są zasilane płynem roboczym z centralnej stacji zasilania obsługującej wszystkie występujące w zakładzie urządzenia. Rzadziej spotykane rozwiązania polegają na zasilaniu urządzeń gazem roboczym ze źródeł w postaci akumulatorów pneumatycznych okresowo ładowanych.

Zajmiemy się przede wszystkim rozwiązaniem źródeł zasilania urządzeń pneumatycznych, pamiętając o tym, że źródła gazu o ograniczonej pojemności można podczas ładowania należycie zabezpieczyć przed zanieczyszczeniami. Przyjmując, że stacja zasilania gazem roboczym jest najczęściej układem wytwarzania, oczyszczania, osuszania i stabilizacji sprężonego powietrza, rozpatrzmy ogólny schemat instalacji pneumatycznej ze szczególnym wskazaniem typowych zastosowań, które określają zasadnicze sposoby włączenia filtrów.

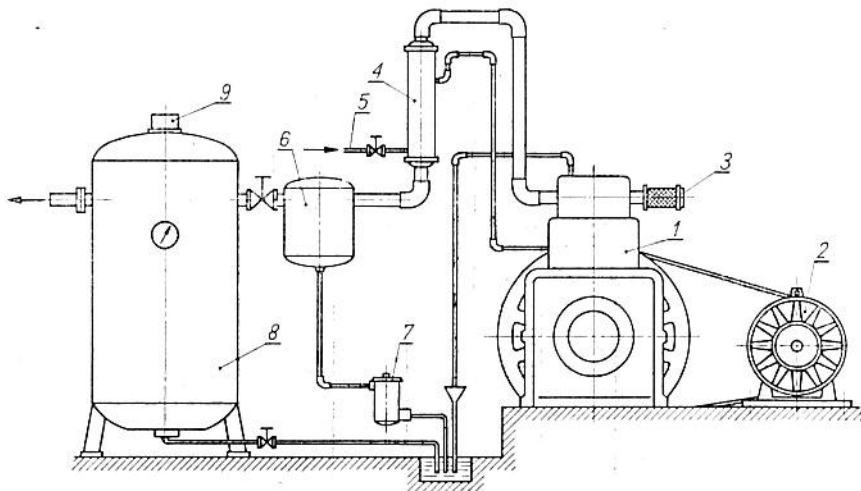
Schemat takiej instalacji przedstawiono na rys. 3.5. Składa się ona z dwu zespołów sprężarkowych pracujących jednocześnie, na przemian lub znajdujących się w układzie rezerwowania. Sprężone powietrze jest tłoczone do instalacji pneumatycznej wyposażonej w zawory odcinające poszczególne linie odbioru powietrza. Linia zasilania obwodów automatycznej regulacji (a) jest wyposażona w zestaw dwu połączonych szeregowo filtrów wstępnego i dokładnego oczyszczania, z odwadniaczami i najczęściej urządzeniami automatycznego usuwania wody oraz kondensatów innych cieczy przedzielonych reduktorem stałego ciśnienia. Linia zasilania urządzeń wykonawczych (b) jest wyposażona w zestaw składający się z filtru, reduktora i smarownicy. Istnieją również przypadki zastosowania takiej instalacji w napędach pneumatycznych, w których ciśnienie lub jego zmiany nie wpływają w istotny sposób na funkcjonowanie urządzeń. Napędy takie są najczęściej wyposażone jedynie w filtr i smarownicę (c). Inne przypadki zastosowań ga-



Rys. 3.5. Schemat instalacji pneumatycznej ze wskazaniem typowych zastosowań i sposobów włączenia filtrów; strzałki wskazują kierunek przepływu powietrza oraz nachylenie przewodów, oznaczenie cyfrowe jak na rys. 3.6 (opis w tekście)

zu roboczego nie wymagają stosowania filtrów w instalacji głównej; mogą one występować w zasilanym urządzeniu jako filtry autonomiczne.

Zespół sprężarkowy zasilania pneumatycznego ma na ogół typową budowę. Przykład rozwiązania przedstawiono na rys. 3.6.

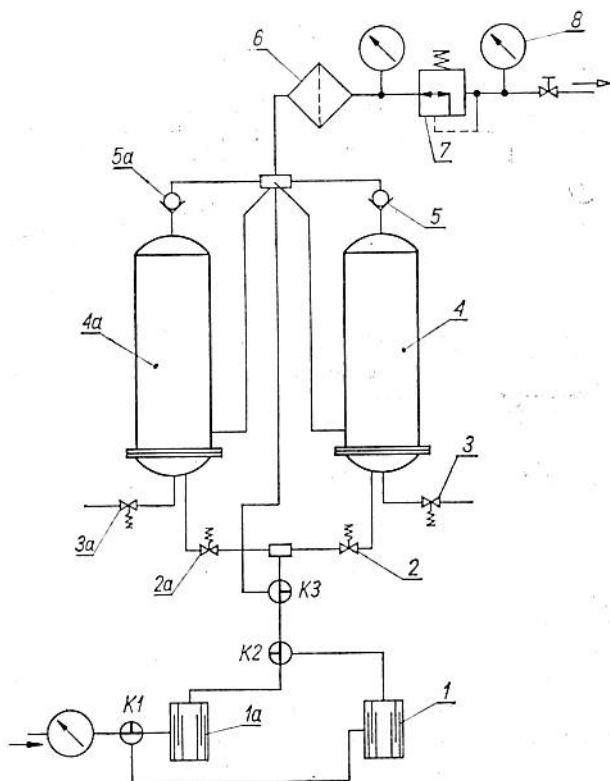


Rys. 3.6. Budowa typowego zespołu sprężarkowego zasilania pneumatycznego

Sprężarka 1 napędzana silnikiem elektrycznym 2 zasysa przez filtr ssawny 3 powietrze i tłoczy je do głównego przewodu wyposażonego w chłodnicę 4, chłodzoną wodą przepływającą przewodem 5 służącym równocześnie do chłodzenia sprężarki. W linii tłoczonyj znajduje się filtr główny instalacji pneumatycznej 6 z odwadniaczem i automatem spustowym 7. Powietrze jest tłoczony do akumulatora 8 wykonanego w postaci dużego zbiornika ciśnieniowego. Akumulator jest wyposażony w niezbędne urządzenia, m. in. w zawór bezpieczeństwa 9 i przekaźnik ciśnieniowy z wyłącznikiem zasilania elektrycznego sprężarki oraz w przewód w dolnej części do okresowego usuwania kondensatu.

W przypadku stosowania sprężarek ze smarowaniem olejowym, zestaw zasilania jest wyposażony w bardziej złożony układ odoliwiania. Przykładem takiego rozwiązania jest zestaw stacji przygotowania powietrza SOP-3 (Przedsiębiorstwo Automatyki Przemysłowej, Falenica) przedstawiony na rys. 3.7. Powietrze ze sprężarki jest odoliwiane przez odoliwiacze 1 i 1a. Zawory odcinające K1 i K2 służą do przemiennego włączania w cykl pracy odoliwiacza 1a lub 1. W tym czasie odoliwiacz nie pracujący może być pod-

dany oczyszczeniu i konserwacji. Odolnione powietrze przechodzi przez sterowane zegarem programowym zawory 2 i 2a odpowiednio do odwadniacza 4 lub 4a. Odwadniacz jest zbiornikiem zawierającym adsorbent (żel krzemionkowy granulowany ϕ 4+8) i wbudowane elementy grzejne. Po odwodnieniu powietrze przechodzi przez zawór zwrotny 5 lub 5a, filtr powietrza 6 do reduk-



Rys. 3.7. Schemat stacji przygotowania powietrza SOP-3 (PAP Falenica)

tora 7 na którym jest ustawione żądane ciśnienie wyjściowe wskazywane przez manometr 8.

W czasie pracy stacji SOP-3, odwadniacze są kolejno włączane w cykl i na przemian poddawane regeneracji. Regeneracja polega na przepuszczaniu przez adsorbent czystego powietrza, ogrzanego za pomocą wbudowanych grzałek, które powoduje odparowanie wody z adsorbentu. Powietrze regenerujące adsorbent jest odpro-

wadzone do atmosfery przez sterowany elektromagnetycznie zawór odcinający 3 lub 3a. Cykl pracy jest najczęściej 8 godzinny i regeneracją odwadniaczy steruje zegar programowy przez zawory elektromagnetyczne 2, 2a, 3 i 3a. W czasie 8 godzinnego cyklu regeneracji, w ciągu 4 pierwszych godzin grzejnik jest włączony, następnie wyłącza się i odwadniacz stygnie.

W celu zabezpieczenia odwadniacza przed nadmiernym nagrzaniem wbudowano układ regulatora temperatury, który współpracuje ze stycznikiem w obwodzie elektrycznym grzałek. W przypadku awarii obydwu odwadniaczy przy niedopuszczeniu przerwania zasilania układu, należy otworzyć zawór K3, tak aby powietrze odoliwiacza przechodziło bezpośrednio do filtra 6. W tym czasie uszkodzone odwadniacze mogą być poddane naprawie bez wyłączenia zasilania całej stacji i przerywania procesu. Również konstrukcja filtra powietrza umożliwia wymianę wkładu filtrującego bez konieczności wyłączenia zasilania. W tym celu należy odpowiednio skręcić trzon filtra z pozycji „Filtr” na pozycję „0”, i po wymianie wkładu ustawić powtórnie trzon w pozycji „Filtr”. Z chwilą włączenia napięcia, zegar programowy steruje odpowiednimi zaworami elektromagnetycznymi, jak również cyklem pracy odwadniaczy.

Stacja SOP-3 charakteryzuje się następującymi danymi technicznymi: ciśnienie zasilania 6 kG/cm², ciśnienie wyjściowe 3 ± 0,5 kG/cm², natężenie przepływu 15 m³/h, temperatura pracy odwadniacza 5 ÷ 35°C, temperatura regeneracji żelu krzemionkowego w odwadniaczu 180 ÷ 200°C, instalacja elektryczna zasilająca 220 V, 50 Hz, wymiary 1200 × 1300 × 2200 mm. Wykonawca zapewnia uzyskanie powietrza bez oleju i zanieczyszczeń, o punkcie rosy niższym o 10°C od temperatury otoczenia.

Układy filtrowania powietrza w pomieszczeniach. Odrębnym zastosowaniem układów oczyszczania powietrza są układy wykorzystywane w pomieszczeniach technologicznych. We współczesnej technice wymaga się coraz częściej użycia pomieszczeń bardzo czystych lub prawie całkowicie pozbawionych zanieczyszczeń mechanicznych o wymiarach powyżej 0,5 μm (produkcja obwodów scalonych, pomieszczenia pamięci maszyn matematycznych, montaż ultraprecyzyjnych mechanizmów, laboratoria biomedyczne i farmaceutyczne, sale operacyjne i sterylne izolatki, pomieszczenia dla personelu przy przetwarzaniu materiałów radioaktywnych itd.). W pomieszczeniach takich zapewnienie odpowiedniej czystości powietrza jest związane z zastosowaniem filtrów ultra- i hiperdokładnych o wysokiej efektywności filtrowania rozumianej jako zdolność procentowa do zatrzymania wszystkich cząstek powyżej umownych wymiarów (najczęściej od 0,5 lub 0,3 μm). Stosowane są najczęściej filtry HEPA (high efficiency particulate air) o efek-

Tablica 3.1. Charakterystyki krajowych filtrów pneumatycznych

Oznaczenie filtru	NFP-2C ¹⁾	N-3/2	ODO-3
Producent	IAP PW	PAP-Falenica	PAP-Falenica
Ciśnienie robocze $10^5 \frac{N}{m^2}$	do 10	2,5-6	do 6
Maksymalne natężenie przepływu $\frac{m^3}{h}$	60	5	20
Spadek ciśnienia na filtrze w $10^5 \frac{N}{m^2}$ przy maksymalnym natężeniu przepływu, przy nadciśnieniu na wyjściu $0 \frac{N}{m^2}$	brak danych	—	0,30
Natężenie przepływu w $\frac{m^3}{h}$ przy spadku ciśnienia na filtrze $0,15 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2}$ przy nadciśnieniu na wyjściu $0 \frac{N}{m^2}$	6	—	15
Spadek ciśnienia w $10^5 \frac{N}{m^2}$ przy natężeniu przepływu $12 \cdot \frac{m^3}{h}$ przy nadciśnieniu na wyjściu $0 \frac{N}{m^2}$	0,50	—	0,10
Średni wymiar porów na podstawie pomiarów geometrycznych w μm	12	40	40
Dokładność oczyszczania w μm^2	20 dla $e_f(x_a) = 0,999$	80	80
	7 dla $e_f(x_n) = 0,950$		
Zakres temperatury pracy °C	-50 — +90	+5 — +50	-30 — +50
Gwint otworu wejściowego i wyjściowego	M12 × 1,5	M10 × 1	M16 × 1,5
Zalecane zastosowanie	filtr dokładny w układzie sterowania	filtr wstępny z reduktorem w układzie sterowania, stabilizowany układ napędu	filtr wstępny w układzie sterowania, układ napędu
Zakres regulacji $10^5 \frac{N}{m^2}$	—	0,02-2	—

¹⁾ Seria prototypowa filtrów.

²⁾ Objaśnienia symboli: x_a — dokładność absolutna, x_n — dokładność nominalna, x_u — dokład-

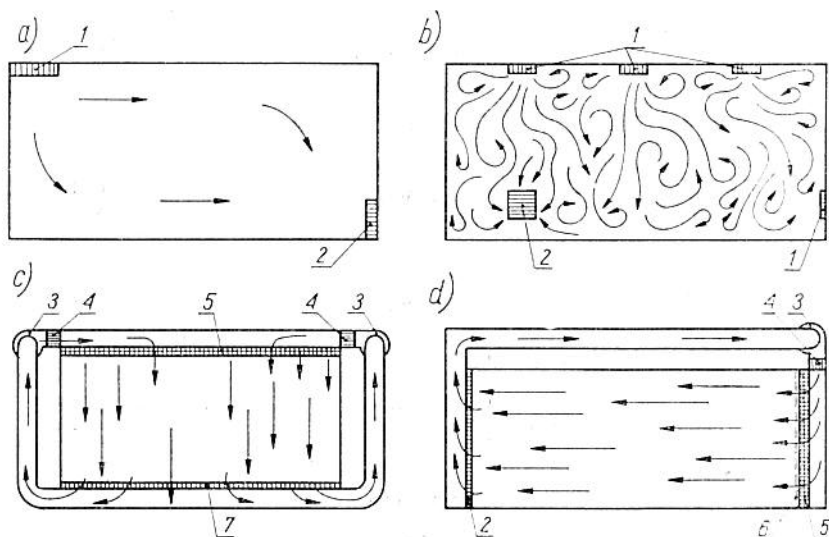
³⁾ Ze względu na stosowanie gumowej przepony w reduktorze, reduktor z filtrem RC-2 nie może

na podstawie badań własnych i danych producenta

FP-1	PNHd-3/8''	311-R1/2''-A 311-R3/4''-A	RC-2	Uwagi
PAP-Falenica	FPIU-Białystok	ZM im. Waltera Radom	KFAP-Kraków	Uwagi
do 10	do 10	brak danych	3-10	dane producenta
20	60	brak danych	2,5	dane producenta
0,36	brak danych	brak danych	—	badania własne
13	7,5	brak danych	—	badania własne
0,135	0,375	brak danych	—	badania własne
20	45	brak danych	35	badania własne
20	20-40	brak danych	40	dane producenta
-30 - +50	+50 - +50	brak danych	-5 - +80 ³⁾	dane producenta
M16 × 1,5	R 3/8''	R1/2''; R3/4''	M12 × 1,25	
filtr główny w układzie sterowania, układ napędu	układ napędu, filtr wstępny w układzie sterowania (średnie przepływy)	układ napędu, filtr wstępny w układzie sterowania (średnie przepływy)	stabilizowany układ napędu, filtr wstępny w układzie sterowania (małe przepływy)	
—	—	—	0-2,5	dane producenta
<p>nośność oczyszczania nie zdefiniowana przez producenta. pracować w tak niskiej temperaturze jak podaje producent.</p>				

tywności większej niż 99,97% w odniesieniu do cząstek 0,3 μm i większych.

W zastosowaniach praktycznych budowy pomieszczeń kondy-cjonowanych wyróżnia się w zasadzie cztery odmiany usytuowa-nia filtrów (rys. 3.8). Rozróżnianie ich jest zależne od stanu i kie-runku przepływu powietrza w pomieszczeniach. *Odmiana konwen-cjonalna* jest realizowana przez umieszczenie za wentylatorem naj-częściej jednego filtra dowolnej konstrukcji i wprowadzenie oczysz-czonego powietrza jednym kanałem do górnej części pomieszcze-nia. Pomieszczenia z przepływem turbulentnym są wyposażone w otwory wlotowe w suficie pomieszczenia i otwory wylotowe w dolnych częściach ścian. Najlepsze rozwiązania są związane z wymuszeniem obiegu zamkniętego realizującego w pomieszcze-



Rys. 3.8. Typy realizacji przepływu oczyszczonego powietrza w pomieszczeniach: a) konwencjonalny, b) turbulentny, c, d) laminarny; 1 — kanały wlotowe, 2 — ruszty wylotu, 3 — wentylatory, 4 — filtry wstępne, 5 — filtry HEPA, 6 — siatka ochronna, 7 — ruszt wylotowy z kratą podłogową

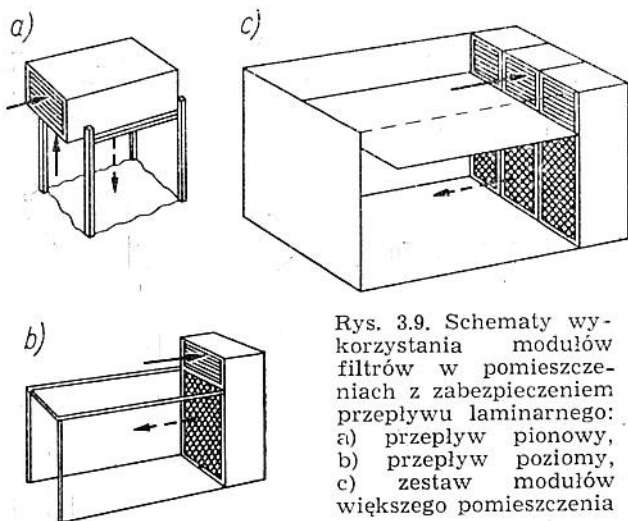
niu przepływ laminarny poziomo (crossflow) lub pionowo (down-flow). Sposób usytuowania filtrów wstępnych i filtrów HEPA, realizujący przepływ laminarny pokazano na rys. 3.8 e i d.

Uznaną odmianą usytuowania filtrów związaną również z ich budową jest tzw. *system modułowy*. Na rys. 3.9 pokazano schematy wykorzystania modułów filtrów (Pathfinder Fan/Filter Mo-

dules) zapewniające uzyskanie przepływu laminarnego (pionowego i poziomego) w pomieszczeniach małych i dużych.

Filtry gazów i cieczy w układach smarowania. Innym zastosowaniem filtrów powietrza są układy zabezpieczające właściwe działanie maszyn, w których najczęściej elementy mechaniczne współpracujące ze sobą muszą być poddane określonym zabiegom. Realizacja takiego zadania sprowadza się do budowy układu smarowania części, przy czym budowane są instalacje pneumatyczne, pneumo-hydrauliczne oraz hydrauliczne. Poniżej przedstawiono typowe zastosowania i sposoby włączania filtra w układach smarowania.

Urządzenia do smarowania części maszyn odgrywają ważną rolę w ich eksploatacji. Wyróżnia się urządzenia ze stosowaniem

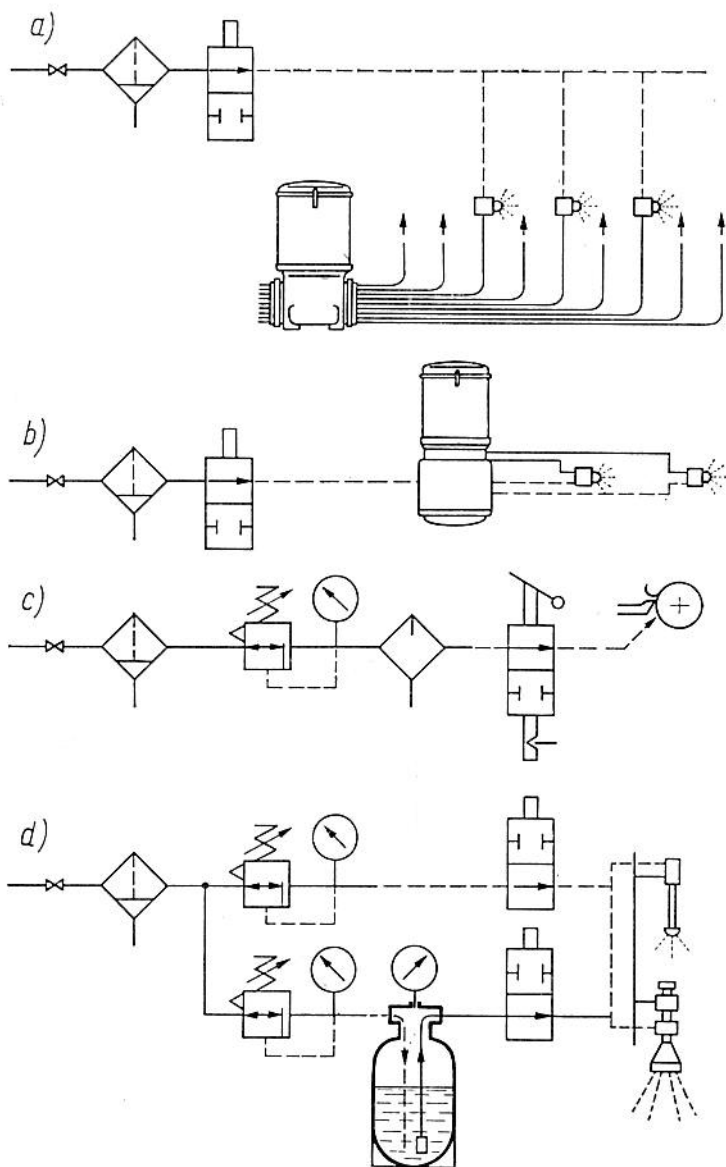


Rys. 3.9. Schematy wykorzystania modułów filtrów w pomieszczeniach z zabezpieczeniem przepływu laminarnego: a) przepływ pionowy, b) przepływ poziomy, c) zestaw modułów większego pomieszczenia

plynu roboczego — smaru w postaci stałej, urządzenia wykorzystujące oleje i smary półpłynne, tzn. oleje o „miękkiej” konsystencji zawierające dodatki mydła, oraz urządzenia wykorzystujące smary w postaci mgły olejowej.

W układach smarowania istotne znaczenie ma stosowanie i umiejscowienie filtra. W urządzeniach smarowniczych zamkniętego obiegu jest zawsze stosowany filtr na ssaniu, tzn. przed dostaniem się oleju do pompy i punktów smarowania. Z reguły instaluje się jeden filtr zbiorczy również w przypadku użycia pomp wieloprzewodowych zasilających oddzielne punkty smarowania.

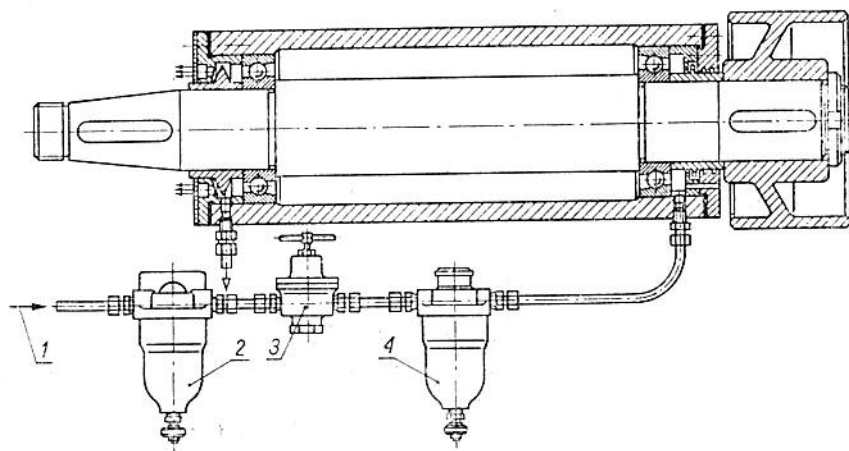
W urządzeniach smarowania rozpylającego i smarowania mgłą olejową zbiornik smaru stałego lub oleju smarnego jest wyposażony



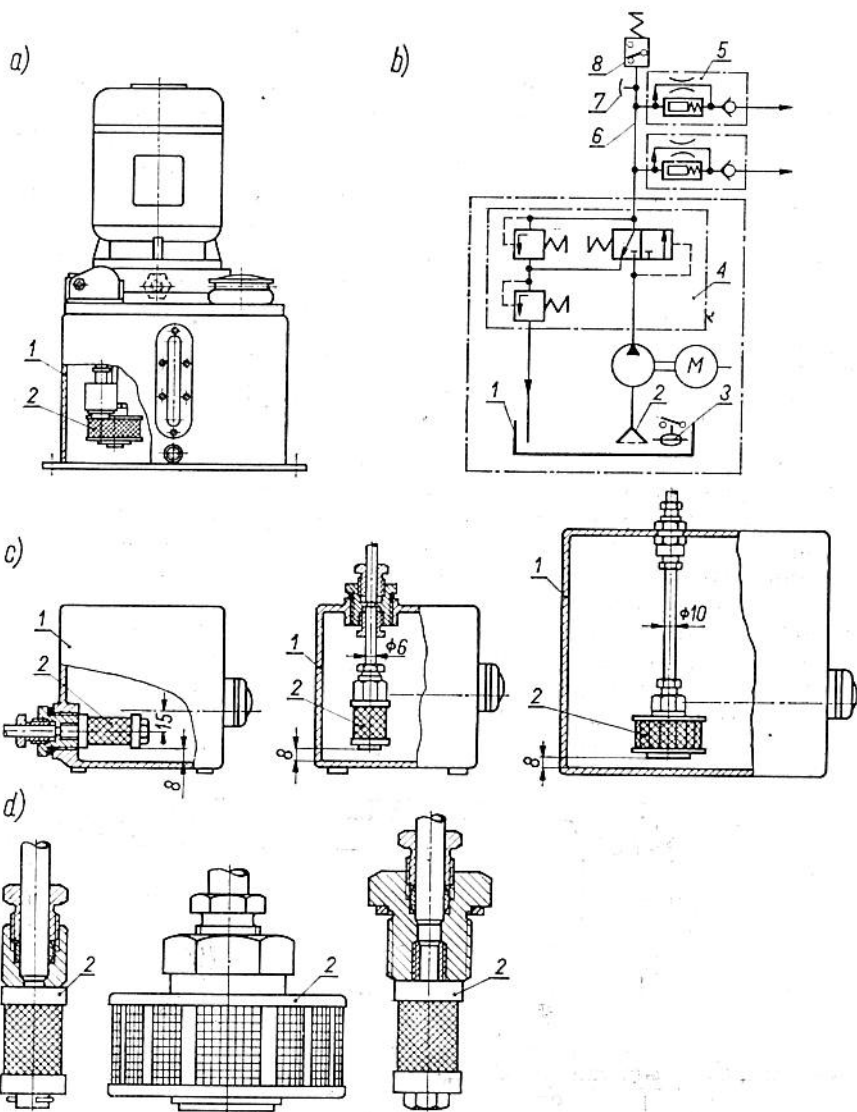
Rys. 3.10. Schematy budowy urządzeń do smarowania rozpylającego i zestawienie filtrów powietrza: a) układ z pompami wieloprzewodowymi do smarów stałych, b) układ do smarowania wtryskowego, c) układ ze smarownicą mikromgłową, d) układ do smarowania olejami i cieczami rozpylającymi rozpuszczalnymi w wodzie

żony w filtr, przy czym w przypadku użycia smarownic smoczko-
wych zbiornik jest napełniony olejem dokładnie odfiltrowanym.
Natomiast instalacja zasilania sprężonym gazem zawsze jest wy-
posażona w filtr pneumatyczny. Mgłą olejową, którą stanowi się
powietrze wzbogacone w mikrokrople olejowe, wykorzystuje się
do smarowania łożysk tocznych pracujących w warunkach norma-
lnych oraz w wysokich temperaturach (huty, walcownie, fa-
bryki, gumy), do smarowania wrzecion wysokoobrotowych (szli-
fierki, turbiny powietrzne, przyrządy dentystyczne), do smarowa-
nia elementów współpracujących narażonych na działanie gazów
szkodliwych i pyłu (przemysł chemiczny, maszyny budowlane), do
smarowania zespołów przekładniowych trudno dostępnych (obra-
biarki, maszyny włókiennicze i papiernicze), do smarowania ze-
społów napędowych łańcuchowych, szyn suwnicowych, przenośni-
ków przegubowych itd.

W urządzeniach smarowania rozpylającego wykorzystuje się
filtry powietrza w zespołach z reduktorem ciśnienia oraz ewen-
tualnie ze smarownicą (rys. 3.10). W urządzeniach smarowania
mgłą olejową są wykorzystywane zestawy *przygotowania mgły*
złożone z filtru powietrza, przeznaczonego do usunięcia zanieczysz-
czeń stałych i par kropli cieczy stanowiących zanieczyszczenia
płynne, regulatora ciśnienia, przeznaczonego do redukcji i stabi-
lizacji oczyszczonego powietrza, oraz smarownicy (olejarki) nor-
malno- lub mikromgłowej (rys. 3.11). Oprócz wspomnianych wy-
żej zastosowań, jednostki filtrująco-regulująco-smarujące stosuje
się do smarowania sprzętu pneumatycznego zawierającego rucho-



Rys. 3.11. Schemat konstrukcyjny zasilania mgłą olejową łożysk wrzeciona;
1 — wlot powietrza pod ciśnieniem, 2 — filtr z odwadniaczem powietrza,
3 — regulator ciśnienia, 4 — smarownica



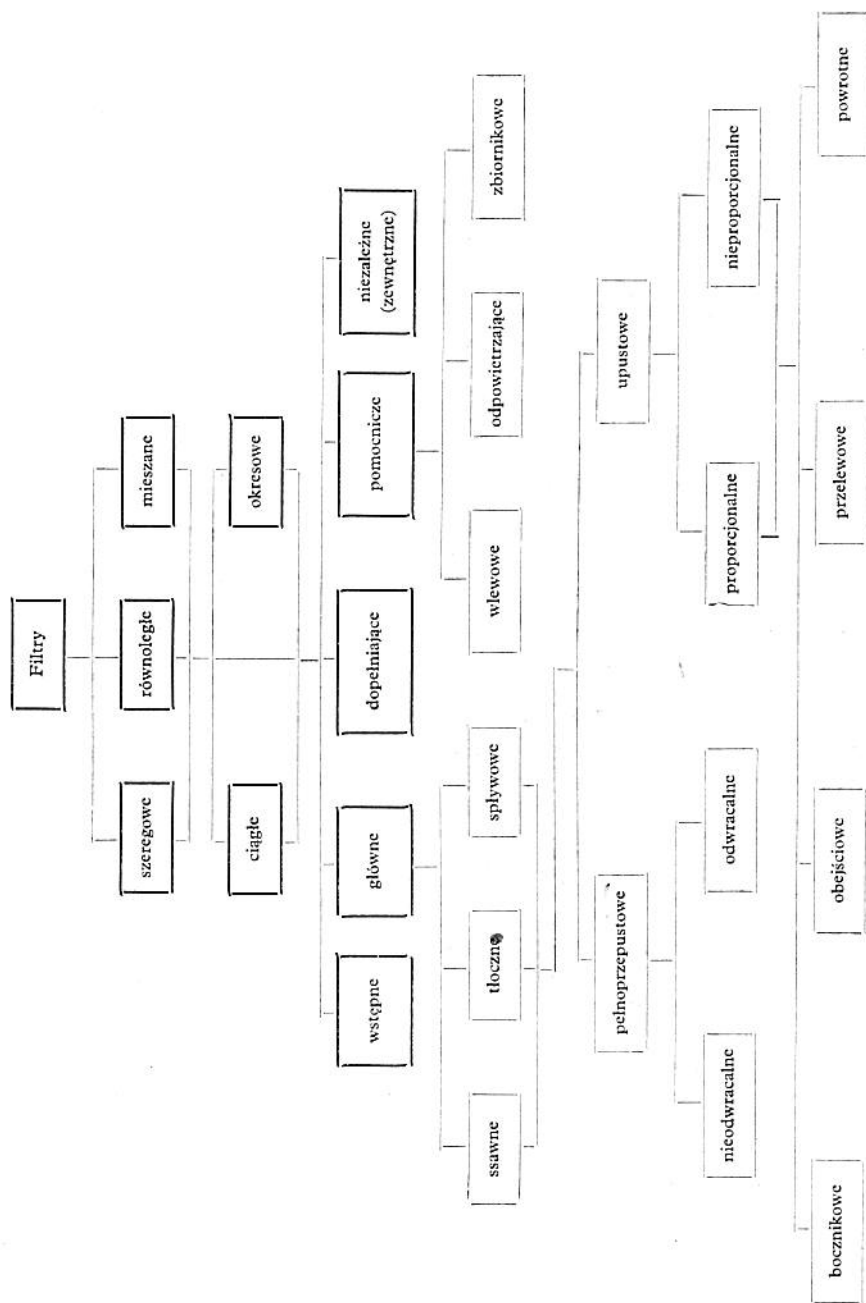
Rys. 3.12. Jednoobwodowy agregat smarujący: a) widok zewnętrzny, b) schemat ideowy agregatu, c) przykłady zabudowy sił ssawnych w zbiorniku olejowym, d) typowe kształty sił ssawnych; 1 — zbiornik oleju, 2 — sito ssawne, 3 — zawór pływakowy, 4 — hydrauliczny blok suwakowy z zaworami stałego ciśnienia i odpowietrzającym, 5 — zawory miareczkujące, 6 — przewód tłoczny, 7 — odpowietrzenie, 8 — wyłącznik ciśnieniowy

me mechaniczne części współpracujące oraz do smarowania ostrzy narzędzi skrawających. W technice urządzeń smarujących rozpowszechniło się bardzo zastosowanie agregatów wykorzystujących smary półpłynne i oleje do smarowania o lepkości $60\div 380$ cSt w 50°C . Zastosowanie takiego płynu roboczego umożliwia smarowanie wielu elementów maszyn przy użyciu tylko jednej smarownicy centralnej i to najczęściej w układzie, w którym jest użyty tylko jeden przewód ciśnieniowy. Przykład typowego jednoobwodowego agregatu smarującego (IVO) pokazano na rys. 3.12. W jednonprzewodowych centralnych instalacjach smarowania olejem filtrami są sita ssawne, w których siatka filtracyjna jest najczęściej wykonana z brązu.

3.2.2 Instalacja hydrauliczna

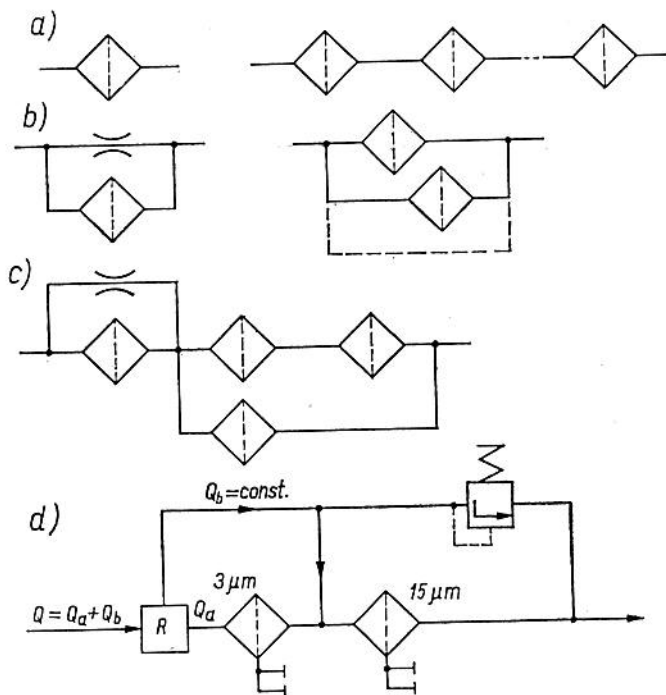
Układy olejowe. Umiejscowienie filtrów w układach hydraulicznych stanowi znacznie trudniejszy problem do rozwiązania, niż umiejscowienie filtrów w instalacjach pneumatycznych. Wiąże się to z główną cechą układów hydraulicznych, jaką jest wykorzystanie cieczy roboczej w cyklu pracy powtarzalnej. Oprócz tego wyróżnia się układy paliwowe, w których ciecz „robocza” jest wykorzystywana w cyklu jednorazowym. Odrębnym zagadnieniem jest także filtrowanie w kolejnych fazach przygotowania cieczy do napełnienia układu hydraulicznego. Rozpatrzmy więc zagadnienie umiejscowienia filtrów z wyodrębnieniem tych przypadków. Na początku zajmiemy się klasyfikacją filtrów ze względu na sposób włączenia do układu, uwzględniając zarówno umiejscowienie filtrów, sposób ich łączenia, czas pracy w układzie, oraz udział filtrów w oczyszczaniu głównego strumienia cieczy. Podział ten przedstawiono na rys. 3.13. Dotyczy on przede wszystkim zastosowania filtrów w typowej instalacji hydraulicznej z autonomiczną stacją zasilania. Omówimy pokrótce poszczególne sposoby połączeń i rodzaje filtrów.

Połączenie szeregowo filtrów polega na takim ich włączeniu, aby cały przepływający strumień cieczy przechodził kolejno przez wszystkie filtry. Przy *równoległym połączeniu filtrów* w jednej linii głównej przez każdy filtr przechodzi tylko część strumienia cieczy. *Połączenie mieszane* jest dowolną kombinacją połączenia szeregowego i równoległego filtrów. Połączenie szeregowo lub mieszane, w którym występują filtry łączone szeregowo jest nazywane *układem filtrowania wielostopniowego*. Przykłady połączeń



Rys. 3.13. Podział filtrów ze względu na umiejscowienie i sposoby instalowania w układach hydraulicznych

filtrów przedstawiono na rys. 3.14. Schemat nowoczesnej i jednocześnie bardzo ekonomicznej budowy filtru dokładnego oczyszczania, uzyskanej przez zastosowanie połączenia szeregowo-równoległego,



Rys. 3.14. Przykłady połączeń filtrów cieczy: a) szeregowego, b) równoległego, c, d) mieszanego

łego zaopatrzonego w regulator stałego objętościowego przepływu R wymuszającego zawsze ściśle określoną wartość natężenia przepływu cieczy przez filtr o dokładności oczyszczenia $15\ \mu\text{m}$, pokazano na rys. 3.14d.

Filtry ciągłego działania i okresowego działania są określane czasem włączenia do pracy. Filtry okresowego działania są to najczęściej filtry zbocznikowane torem linii hydraulicznej z zaworem dwupołożeniowym.

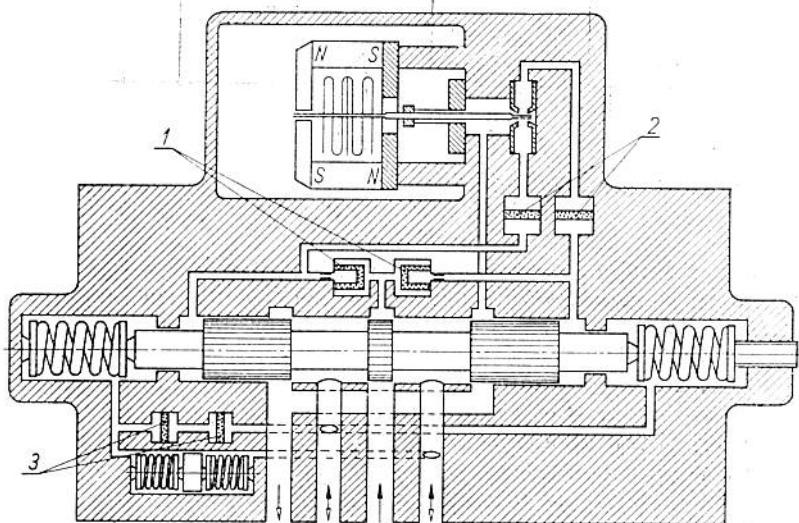
Filtry wstępne w układzie hydraulicznym spełniają rolę zabezpieczającą przed dostaniem się zanieczyszczeń dużych rozmiarów lub części stałych przypadkowo znajdujących się w instalacji lub zbiorniku. Wykonywane są przeważnie jako sita zgrubne (streiners) i na ogół nie spełniają one roli filtrów układu hydraulicznego zapewniających uzyskanie określonej lub wymaganej

czystości cieczy. Niekiedy rolę filtrów wstępnych spełniają *filtry pomocnicze wlewowe* lub *filtry główne ssawne*.

Filtry niezależne, nazywane też *filtrami zewnętrznymi*, są umieszczane w obwodzie niezależnym od układu. Są to przede wszystkim filtry ciągłego lub okresowego działania oczyszczające ciecz w zbiorniku, wyposażone w niezależny generator ciśnienia.

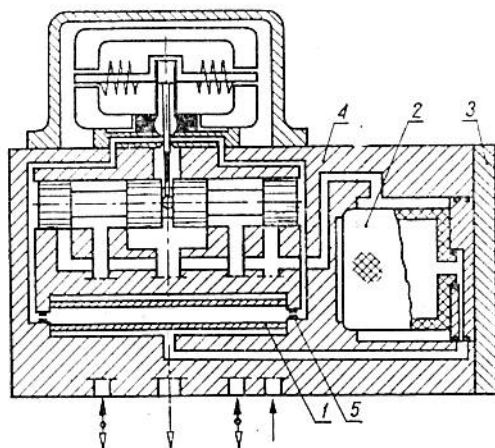
Filtry pomocnicze układu hydraulicznego stanowią wspomniane już filtry wlewowe, filtry powietrza umieszczone w górnej części zbiorników hydraulicznych stacjonarnych oraz filtry „własne” zbiornika, przeważnie filtry magnetyczne w postaci korków lub koszy magnetycznych. Rolę taką spełnia również sam zbiornik z przegrodami będący w takim wykonaniu filtrem grawitacyjnym.

Filtry dopełniające, zwane też niekiedy *filtrami wewnętrznymi*, są instalowane wewnątrz różnych urządzeń tworzących układ hydrauliczny, szczególnie w tych przypadkach, gdy jest wymagane zabezpieczenie bardzo ważnych i czułych elementów, takich jak opory kalibrowane urządzeń sterujących, precyzyjne zespoły par suwakowych, zespoły dysza-przysłona i inne. Dwa przykłady zabudowy filtrów dopełniających we wzmacniaczach hydraulicznych przedstawiono na rys. 3.15 i 3.16. Uwidaczniają

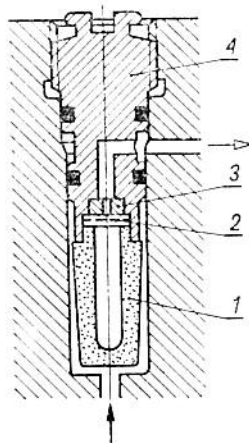


Rys. 3.15. Przykład umiejscowienia filtrów wewnętrznych we wzmacniaczu elektrohydraulicznym proporcjonalnym z dynamicznym sprzężeniem zwrotnym od obciążenia (Moog); 1 — filtry stałych oporów wejściowych kaskad sterujących, 2 — filtry zespołu sterującego dysza-przysłona, 3 — filtry oporu tłumiącego korektora sprzężenia dynamicznego

one możliwości instalowania filtrów przed wszystkimi elementami sterującymi oporowymi wzmacniacza oraz filtru centralnego kaskad sterujących, zabezpieczonego dodatkowo filtrem włączonym szeregowo z wymiennym wkładem. System przedstawiony na rys. 3.16 stanowi nowoczesniejsze rozwiązanie ze względu na



Rys. 3.16. Umiejscowienie centralnego filtra wewnętrznego wzmacniacza elektrohydraulicznego (Dowty, seria 72) szeregowo z filtrem wewnętrznym „wstępnym” mającym możliwość wymiany; 1 — filtr centralny zespołu dysza-przysłona, 2 — filtr wymienny, 3 — pokrywa filtru wymiennego, 4 — dwustopniowy wzmacniacz elektrohydrauliczny, 5 — opory stałe (wejściowe) kaskad sterujących dysza-przysłona



Rys. 3.17. Schemat konstrukcyjny filtra dopełniającego dla zabezpieczenia oporu hydraulicznego małej średnicy; 1 — filtr spiekany, 2 — siatka zabezpieczająca za filtrem spiekany, 3 — opór hydrauliczny, 4 — oprawka filtra

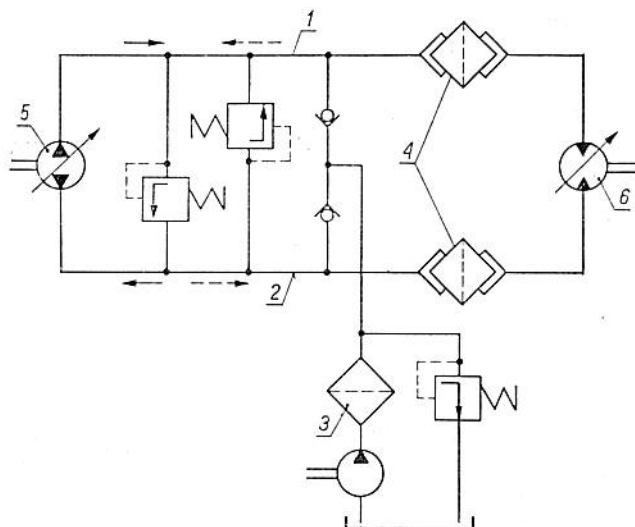
prostą konstrukcją i możliwością wbudowania filtrów o czułych powierzchniach filtracyjnych. Przykład konstrukcji filtra dopełniającego instalowanego do zabezpieczenia oporów hydraulicznych pokazano na rys. 3.17.

Filtry główne są najważniejszymi filtrami w układzie hydraulicznym, gdyż one w głównej mierze decydują o uzyskaniu pożądanych efektów w zakresie poziomu czystości cieczy pracującej w układzie. Umieszczane są one w linii ssania, linii tłoczenia oraz na splywie. Filtry główne mogą być pełnoprzepustowe (pełnoprzepływowe) i upustowe (niepełnoprzepływowe).

Filtry główne pełnoprzepustowe są to takie filtry, przez które przepływa całkowity strumień cieczy przeznaczonej do realizacji

zadania układu hydraulicznego. Dzieli się je na *filtry nieodwracalne* (jednokierunkowego przepływu) oraz *filtry odwracalne* (dwukierunkowego przepływu lub podwójnego działania) stosowane w układach, które dopuszczają zmianę kierunku strumienia cieczy (rys. 3.18).

Filtry główne upustowe dzieli się na *filtry proporcjonalne* (rys. 1.27), zachowujące stały stosunek między ilością płynu przepływającego przez filtr a ilością całkowicie przepływającą w linii

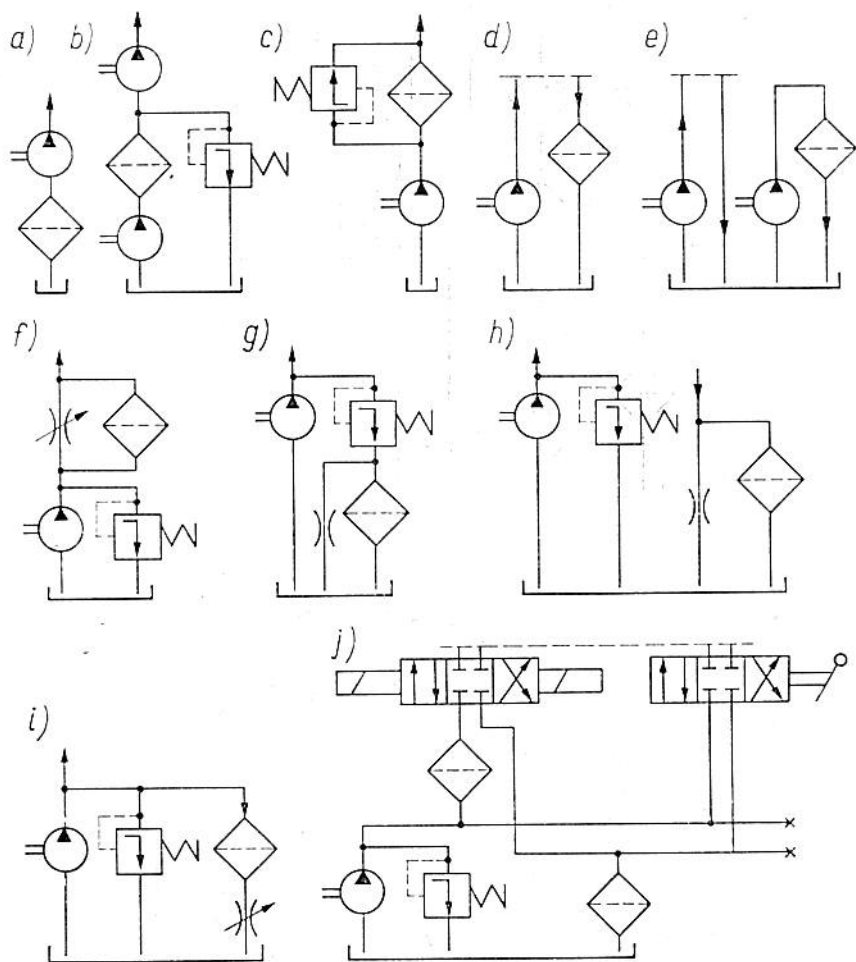


Rys. 3.18. Włączenie filtrów odwracalnych w układ napędu hydraulicznego z pompą o zmiennej wydajności; 1 — linia wysokiego lub niskiego ciśnienia, 2 — linia niskiego lub wysokiego ciśnienia, 3 — filtr linii tłocznej niskiego ciśnienia, 4 — filtry odwracalne, 5 — pompa o zmiennej wydajności, 6 — silnik hydrauliczny

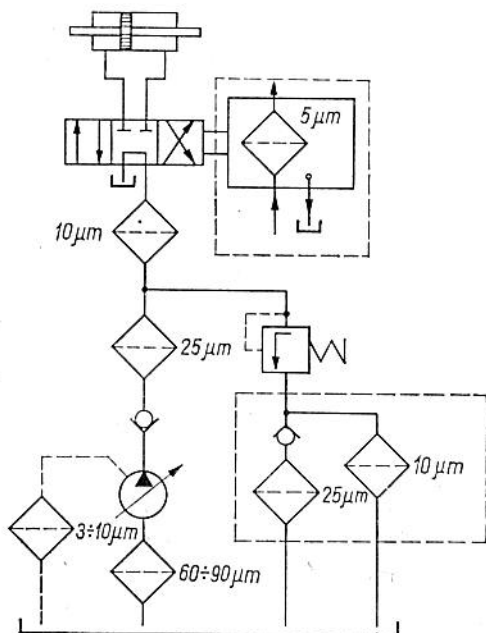
głównej, oraz *filtry nieproporcjonalne*, w których ten stosunek jest zmienny. Filtry upustowe są instalowane jako filtry boczni-kowe, obejściowe przelewowe, powrotne oraz o różnych kombi-nacjach.

Na rys. 3.19 pokazano najważniejsze schematy włączenia fil-trów hydraulicznych. Typowe, zalecane umiejscowienie filtrów w układzie hydraulicznym wysokociśnieniowym, z podaniem do-kładności oczyszczania, pokazano na rys. 3.20. Układ jest wypo-sażony w filtr ssawny, dwa filtry tłoczne i dwa filtry przelewowe oraz filtr wewnętrzny i filtr drenażowy przecieków pompy.

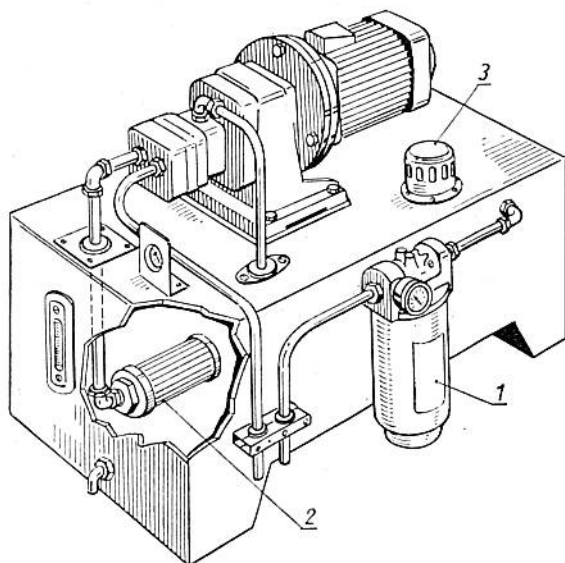
Ważną rolę odgrywa również standardowe wyposażenie stacji zasilania w filtry. Na rys. 3.21 pokazano schemat budowy ty-



Rys. 3.19. Schematy włączenia filtrów w instalacji hydraulicznej: a) filtr ssawny, b) filtr ssawny z pompą wspomagającą, c) filtr tłoczny, d) filtr sphywowy, e) filtr niezależny, f) filtr upustowy bocznikowy, g) filtr przelewowy, h) filtr powrotny, i) filtr obejściowy, j) układ mieszany filtra tłoczno-sphywowego



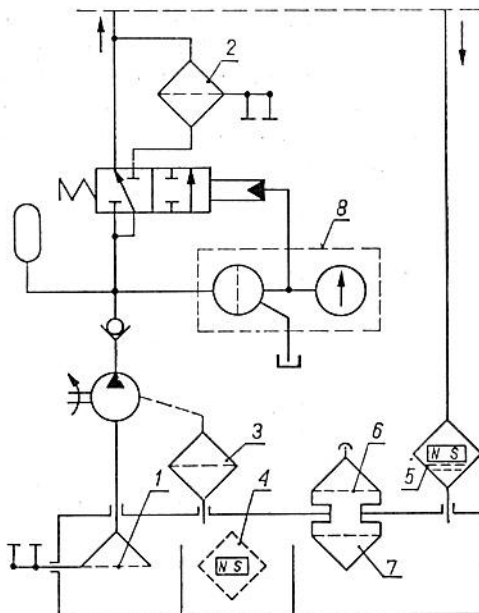
Rys. 3.20. Typowe umiejscowienia filtrów hydraulicznych oraz zalecane dokładności oczyszczania



Rys. 3.21. Schemat typowego wyposażenia stacji zasilania w filtry

powego zespołu zasilania hydraulicznego wyposażonego w filtr wlewowy i odpowietrzający 3, w filtr główny sphywowy 1 oraz filtr ssawny 2.

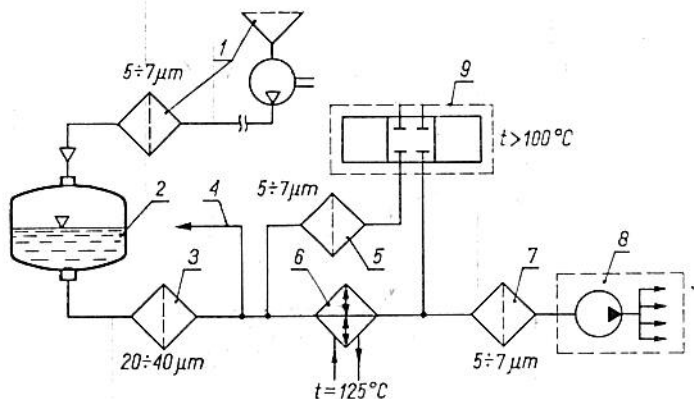
Nowoczesne ofiltrowanie układu zasilania hydraulicznego przedstawiono na rys. 3.22. Ciecz ze zbiornika jest zasysana przez filtr 1 z dwustopniowym wskaźnikiem stanu zanieczyszczenia i z kolei jest dostarczana do układu. W linii tłocznej jest umieszczony filtr wysokociśnieniowy 2 włączany okresowo, a w linii



Rys. 3.22. Schemat wyposażenia nowoczesnej stacji zasilania hydraulicznego w filtry

drenażu przecieków pompy — filtr 3. W zbiorniku cieczy, w jego środkowej komorze znajduje się filtr magnetyczny np. w postaci kosza magnetycznego. W linii sphywowej umieszczono filtr kombinowany mechaniczno-magnetyczny 5. Filtry pomocnicze, wlewowy 7 i odpowietrzający 6 znajdują się w płycie górnej zbiornika. W odgałęzieniu linii tłocznej jest umieszczony kolmatacyjny analizator czystości cieczy 8 wraz ze wskaźnikiem klasy czystości. Analizator jest zbudowany w ten sposób, że spełnia rolę układu sterowania czystością cieczy dzięki wyposażeniu go w czujnik kolmatacyjny działający ciągle oraz zespół przetwarzania danych do sterowania zaworem włączania i wyłączania filtru głównego 2 w linii tłocznej.

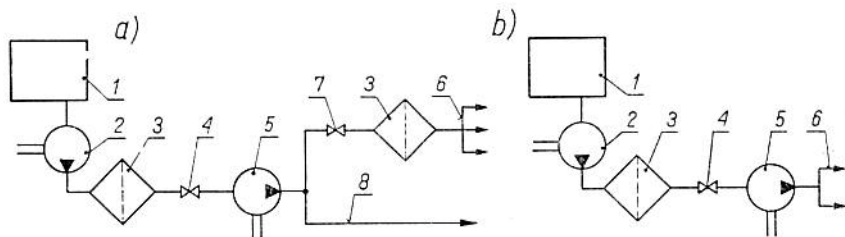
Układy paliwowe. Odrębnym zagadnieniem jest oczyszczanie paliwa, które w wielu przypadkach spełnia nie tylko rolę źródła energii chemicznej napędu pojazdów, lecz także rolę czynnika roboczego układów sterowania. Wiele instalacji paliwowych cechują odrębne rozwiązania wynikające z charakteru obiektu. Dotyczy to głównie układów paliwowych samolotów, w których usytuowanie obiektu ciągle zmienia się, a układ paliwowy podlega wielu oddziaływaniom utrudniającym klasyczne rozwiązanie oczyszczania cieczy. Zmiany położenia zbiornika, przyśpieszenia i wysokie temperatury stanowią typowe, niekorzystne oddziaływania. Ze względu na tak niekorzystne oddziaływania buduje się hermetyczne zbiorniki bez filtrów, natomiast układ filtrowania wyposaża się w filtry specjalnych konstrukcji, na ogół bez komór osadzących. Przykład umiejscowienia filtrów w układzie zasilania paliwem silników odrzutowych przedstawiono na rys. 3.23. W ukła-



Rys. 3.23. Przykład schematu oczyszczania paliwa silników odrzutowych; 1 — filtry powietrza przed i za sprężarką, 2 — zbiornik paliwa, 3 — filtr paliwa chłodnego (pierwszy stopień oczyszczania), 4 — magistrala paliwa wykorzystanego do sterowania, 5 — filtr urządzeń sterujących silnika, 6 — wymiennik ciepła (nagrzewnica olejowa), 7 — filtr paliwa nagrzanego (drugi stopień oczyszczania), 8 — zespół pomp i wtryskiwaczy, 9 — urządzenia regulacji mechanizmów silnika odrzutowego

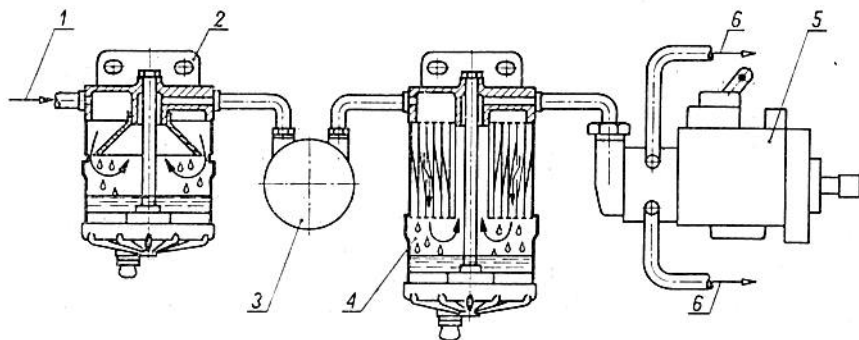
dzie tym wyodrębniony został układ filtrowania paliwa napędowego i paliwa do sterowania. W układzie paliwowym rozruchu silnika odrzutowego z zasady stosuje się pompy wspomagające, dostarczające paliwo przez filtr do pompy rozruchu (wtryskowej). Pompy wspomagające są najczęściej budowane jako pompy hydrodynamiczne stałego ciśnienia, nie wymagające stosowania zaworów bezpieczeństwa (rys. 3.24).

Filtry w układach paliwowych silników wysokoprężnych stanowią odrębną dziedzinę ze względu na powszechność ich stosowania. Głównym czynnikiem powodującym niesprawność pracy

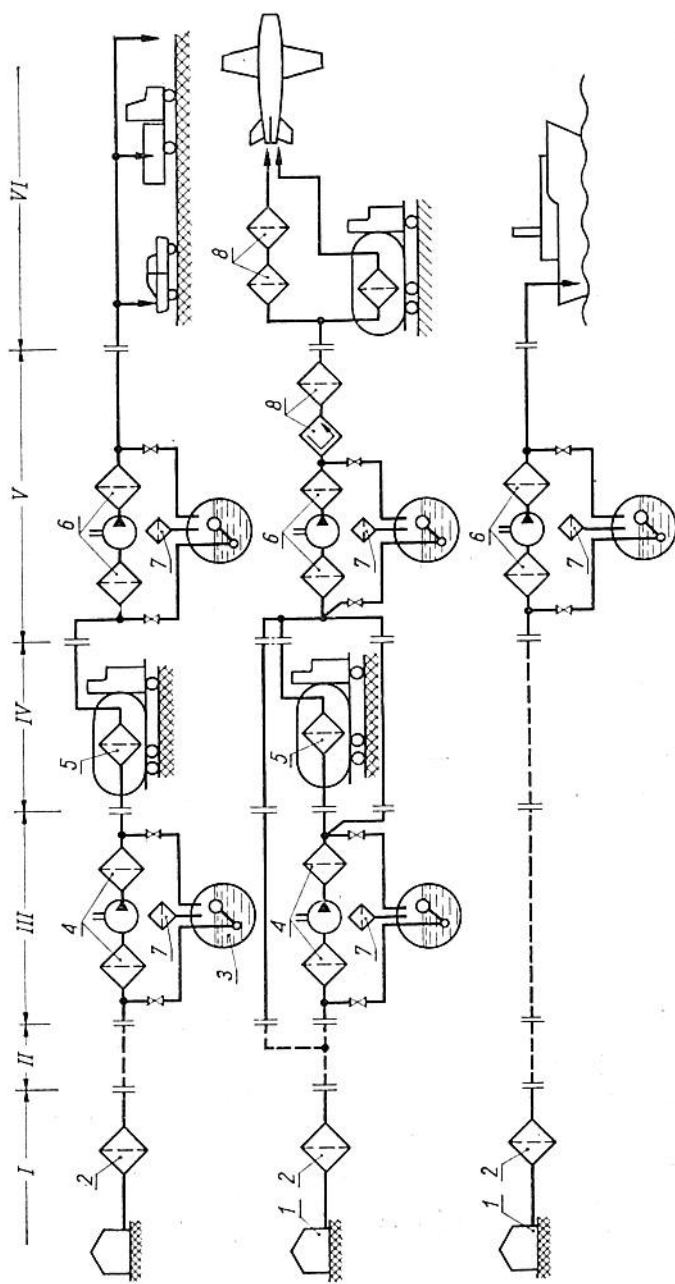


Rys. 3.24. Sposób włączenia filtrów w układach rozruchu silnika odrzutowego: a) układ wykorzystujący paliwo podstawowe silnika, b) układ autonomiczny wykorzystujący ciecz specjalną; 1 — zbiornik paliwa, 2 — pompa wspomagająca, 3 — filtr, 4 — zawór, 5 — pompa rozruchu silnika, 6 — wtryskiwacze rozruchu, 7 — zawór rozruchu sterowany elektromagnetycznie, 8 — przewód do głównej instalacji paliwa

silników wysokoprężnych (Diesla) są zanieczyszczenia stałe oraz woda zawarta w paliwie. Zbyt duże ilości takich zanieczyszczeń powodują mniej sprawne działanie układu wtryskowego, intensywniejsze zużycie mechanicznych części współpracujących i wzrost korozji. Wszystkie te czynniki przyczyniły się do opracowania specjalnych konstrukcji filtrów oraz układów szeregowego ich włączenia. Typowym przykładem jest system CAV Filtrap (rys. 3.25), w którym paliwo przewodem 1 przedostaje się do filtru wytrącającego duże krople wody 2, wykonanego w postaci prostego osadnika składającego się z głowicy, przysłony i komory osadcej. Pompa podawcza 3 tłoczy paliwo do filtru porowatego o dużej powierzchni filtrowania 4 wyposażonego również w komorę osadczą umożliwiającą osadzenie się małych kropeł wody.



Rys. 3.25. Typowy układ filtrowania paliwa silników wysokoprężnych

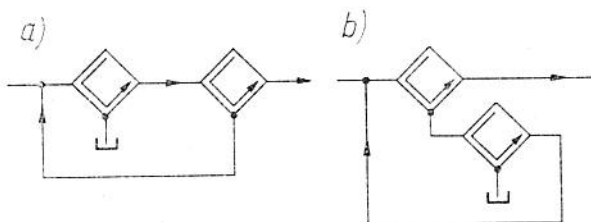


Rys. 3.26. Cykl przygotowania cieczy roboczych do napełniania układów hydraulicznych olejowych i paliwowych obiektów komunikacyjnych; 1 — zbiornik zakładu produkcyjnego, 2 — filtry zakładu produkującego ciecz roboczą przeznaczone do oczyszczania przed napełnieniem system transportowych lub przed dostarczeniem do rurociągów transportowych, 3 — zbiornik składowania długotrwałego, 4 — filtry stacji przelączania, 5 — filtry środków transportu detalicznego (kolejowe, samochodowe, wodne, lotnicze), 6 — filtry stacji przelączania odbiorcy detalicznego, 7 — filtry powietrza zbiorników składowania cieczy, 8 — filtry specjalne oczyszczania cieczy dla instalacji samolotów

Tak oczyszczone paliwo jest dostarczane do pompy wtryskowej 5 i przewodem 6 do wtryskiwaczy.

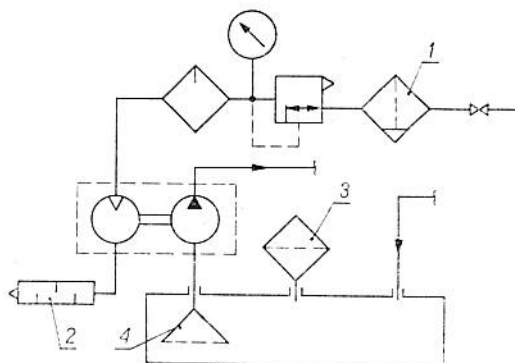
Filtry w układach przygotowania cieczy. Cykl przygotowania cieczy roboczych obejmuje kilka etapów. Obrazowo przedstawiono etapy przygotowania paliwa, olejów napędowych i innych cieczy roboczych przeznaczonych do zastosowania w obiektach komunikacyjnych, takich jak samochody, samoloty oraz statki (rys. 3.26). Układy filtrowania znajdują się w pierwszym etapie obejmującym produkcję cieczy (etap I). Wyprodukowana ciecz podczas dostarczania do środków transportu jest filtrowana w zakładzie produkcyjnym przez filtry (etap II), a następnie umieszczana w zbiorniku długotrwałego składowania (etap III). Stąd okresowo ulega przekazywaniu do środków transportu detalicznego (etap IV), do składowania odbiorcy (etap V) oraz do napełniania urządzeń (etap VI). W przypadku wykorzystania cieczy roboczych na statkach, ze względu na znaczne ich zapotrzebowanie do pracy w urządzeniach okrętowych, pomija się najczęściej etapy II, III, IV. Rozwiązuje się to przez budowę zakładów produkcji cieczy roboczych w portach, skąd rurociągami tłoczy się przygotowaną ciecz do składowania w pobliżu statków lub bezpośrednio na statki. Cykl przygotowania cieczy do napełniania urządzeń samochodowych i lotniczych nie różni się zbytnio, z wyjątkiem końcowego etapu napełniania u odbiorcy. Cykl filtrowania cieczy do urządzeń lotniczych jest bardziej wydłużony i obejmuje większą ilość operacji filtrowania.

W układach, w których paliwo jest wykorzystywane w dużej ilości jako ciecz robocza, odrębnym zagadnieniem jest efektywne oczyszczenie tej cieczy a więc przeznaczenie wielkich nakładów finansowych na zainstalowanie filtrów porowatych. Z tych też względów często używa się jako filtrów wstępnego oczyszczania *filtrów odśrodkowych*, np. hydrocyklonów lub wirówek. Schematy na rys. 3.27 przedstawiają sposoby połączeń hydrocyklonów (z upustem) przy oczyszczaniu dużych ilości cieczy. Układy takie mogą być stosowane do ciągłego oczyszczania w pomieszczeniach składowych cieczy, a odpływ części cieczy silnie zanieczyszczono-



Rys. 3.27. Sposoby szeregowego połączenia hydrocyklonów przy oczyszczaniu: a) intensywnym, b) ekstensywnym

nej może być skierowany do specjalnych pojemników spełniających rolę filtrów grawitacyjnych. Również ważnym zagadnieniem jest zabezpieczenie cieczy łatwopalnych przed ich zapłonem. Stosowanie pomp z napędem elektrycznym zwiększa także niebezpieczeństwo. Stosowane są zatem napędy pneumo-hydrauliczne wykorzystujące silniki napędowe zasilane powietrzem. Umieszczenie filtrów w takim zespole zasilającym pokazano na rys. 3.28.



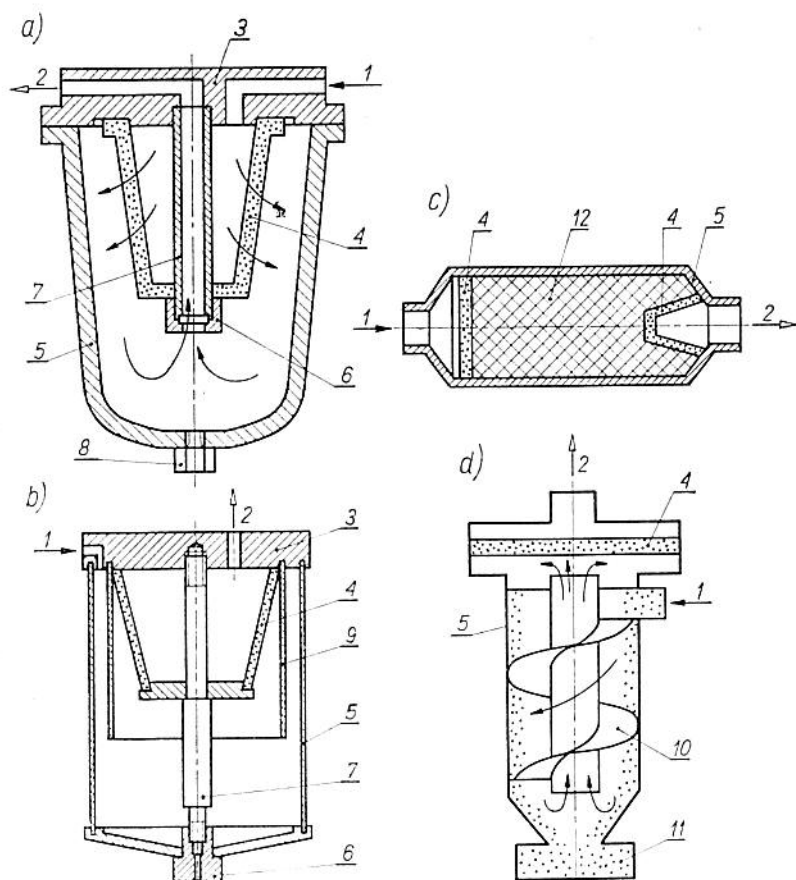
Rys. 3.28. Umieszczenie filtrów w układach zasilających z zastosowaniem pompy pneumohydraulicznej; 1 — filtr powietrza w linii zasilania silnika pneumatycznego, 2 — porowaty tłumik dźwięku, 3 — filtr powietrzny zbiornika hydraulicznego, 4 — filtr hydrauliczny w linii ssania

Przedstawione tutaj rozważania omawiające układy przygotowania płynu roboczego i sposoby włączenia filtrów stanowią punkt wyjścia do projektowania urządzeń filtracyjnych. Umieszczenie filtru w układzie określa warunki, jakim musi odpowiadać filtr zarówno pod względem budowy konstrukcyjnej (wytrzymałość, sposoby zamocowania, wyposażenie pomocnicze), efektywność filtrowania (parametry filtracyjne), jak i wymaganych natężeń przepływu i dopuszczalnych spadków ciśnienia płynu (parametry płynodynamiczne).

3.3. Filtry układów pneumatycznych

3.3.1 Zasady konstruowania filtrów pneumatycznych

Filtry układów pneumatycznych można podzielić na dwie zasadnicze grupy wyróżniające się stopniem wyposażenia najczęściej związanym ze specyfiką zastosowania. Do pierwszej grupy należą

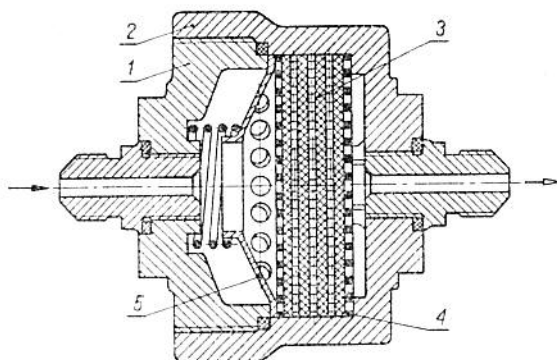


Rys. 3.29. Schematy prostych filtrów gazów: a, b) oczyszczania i wytrącania cieczy, c) oczyszczania i osuszania, d) wytrącania ciężkich cząstek stałych i oczyszczania; 1 — wlot zanieczyszczonego gazu, 2 — wylot gazu oczyszczonego, 3 — kadiub filtra, 4 — wkład filtracyjny, 5 — osłona filtra, 6 — nakrętka zamocowująca, 7 — króciec, 8 — korek spustowy, 9 — ekran, 10 — kierownica spiralna, 11 — zbiornik zanieczyszczeń, 12 — wkład chemicznego oczyszczania (np. silikażel)

filtry o konstrukcjach prostych przeznaczone do filtrowania głównie zanieczyszczeń stałych, natomiast do drugiej — filtry wyposażone w urządzenia i elementy dodatkowego kondycjonowania gazu. Wśród tych ostatnich najczęściej spotykanym wyposażeniem są pomocnicze urządzenia filtrowania energetycznego (*gazocyklony*) konstrukcyjnie związane z filtrem mechanicznym gazu, zespoły termochemiczne kondycjonowania zawartości zanieczyszczeń ciekłych i niekiedy gazowych, urządzenia stabilizacji przepływu lub ciśnienia gazu oraz urządzenia pomocnicze, takie jak automaty spustowe kondensatu, urządzenia oczyszczania wkładu filtracyjnego, wskaźniki wilgotności gazu, sygnalizatory stopnia zanieczyszczenia filtra, zawory bezpieczeństwa i przełączające, smarownice oraz wiele innych.

Do kondycjonowania powietrza w pomieszczeniach i przy wykorzystaniu gazu jako pomocniczego płynu roboczego zazwyczaj są stosowane filtry o konstrukcjach prostych wyposażone jedynie w przegrody porowate lub filtry energetyczne typu płynodynamicznego (odśrodkowe, uderzeniowe) albo grawitacyjnego. Do wykorzystania gazów roboczych pod ciśnieniem, nawet w najprostszych konstrukcjach są z reguły stosowane takie elementy filtrów, które przynajmniej częściowo umożliwiają kondycjonowanie innych parametrów gazów, oprócz zanieczyszczeń stałych.

Cztery schematy pokazane na rys. 3.29 wyjaśniają zasady konstrukcyjne budowy prostych filtrów gazu. Schemat konstrukcyjny prostego filtra służącego do oczyszczania powietrza lub azotu pod dużym ciśnieniem rzędu 150 kG/cm^2 stosowanego w pneumatycznych instalacjach samolotu IŁ-18 pokazano na rys. 3.30. Wkład filtracyjny złożony z wielu warstw materiału włókninowego 3, umieszczonego między sitami tkanymi z drutu metalowego 4,



Rys. 3.30. Wielowarstwowy filtr gazu prostej konstrukcji

znajduje się w ciśnieniowej obudowie 2, w której od strony wlotu gaz przechodzi przez kanał pokrywy 1 i odrzutnik 5.

Najczęściej zastosowanie filtrów powietrza w instalacjach pneumatycznych ma na celu uzyskanie nie tylko jak największej czystości powietrza pod względem zawartości cząstek stałych, ale również — minimalnej wilgotności względnej. W większości stosowanych rozwiązań urządzeń pneumatycznych jest wymagane ciśnienie zasilania rzędu 2÷7 kG/cm², przy czym jako gazu roboczego używa się powietrza atmosferycznego.

W odróżnieniu od układów hydraulicznych, gaz w układach pneumatycznych nie pracuje w obiegu zamkniętym, lecz jest pobierany bezpośrednio z otoczenia i po wykonaniu zadania jest usuwany poza układ. Stanowi to poważną zaletę układów pneumatycznych (brak przewodów spływowych), powoduje jednak równocześnie konieczność ciągłego zmniejszania wilgotności względnej zasysanego powietrza. Należy zauważyć, że nawet w naszym klimacie wilgotność względna jest duża (średnio ok. 60%) i część pary wodnej skrapla się w przewodach urządzenia. Na przykład przy 70% wilgotności względnej powietrza i temperaturze 15,5°C, przy poborze powietrza w ilości 10 m³/min w ciągu 8 godzin pracy urządzenia pobiera się ilość pary wodnej równoważną 43 litrom wody. Jest to zjawisko wybitnie niekorzystne, gdyż woda skroplona na przeważnie odczyn kwaśny (2,5 do 4,5 pH) i sprzyja korozji urządzenia, zmienia charakterystyki robocze elementów, może powodować oblodzenie, a także (jak wykazały ostatnie badania) powoduje „puchnięcie” niektórych rodzajów uszczelki. Dlatego też jednym z zasadniczych zadań urządzeń przygotowania powietrza jest zmniejszenie jego wilgotności względnej do (co najwyżej) 60 do 80%, co można uzyskać przez:

— ochłodzenie powietrza po sprężeniu do temperatury niższej od temperatury obwodu roboczego (skrapla się wtedy część pary nasyconej, a po przejściu do wyższej temperatury para nasycona przechodzi w suchą),

— możliwie największe praktycznie i ekonomicznie uzasadnione sprężenie powietrza (powietrze rozprężając się następnie w zaworze redukcyjnym do ciśnienia obwodu roboczego, przy nieznacznym obniżeniu temperatury zwiększa swą objętość i para nasycona przechodzi w suchą),

— stosowanie specjalnych filtrów i urządzeń osuszających (np. filtrów z wkładami z włókien papieru, drobnych wiórów metalowych, waty szklanej, kulek metalowych czy drobnych kawałków filcu, na których para wodna osiada w postaci drobnych kropeł, lub filtrów z ziemią okrzemkową itp. jako środkiem absorpcyjnym).

Główne zadanie we właściwym przygotowaniu powietrza spełnia stacja zasilania i użyte w niej filtry, niemniej jednak prawie zawsze istnieje konieczność zastosowania dodatkowo urządzeń oczyszczających umieszczonych w bezpośredniej bliskości układu roboczego. W nich też sprężony gaz, dostarczany do układów pneumatycznych, powinien być ostatecznie dokładnie filtrowany w celu usunięcia z niego wszelkiego rodzaju zanieczyszczeń mechanicznych i wytrącenia ciał ciekłych. Ciała ciekłe wytrąca się w filtrze w postaci kropeł kondensatu osiadających na ściance wewnętrznej zbiornika filtru. Wytrącone krople powinny być jak najszybciej odprowadzone ze strefy przepływu gazu w filtrze do strefy spokoju w dole zbiornika oraz podczas każdej przerwy w pracy filtru, tzn. gdy ciśnienie wewnątrz filtru jest równe ciśnieniu otoczenia, nagromadzone wewnątrz filtru zanieczyszczenia i ciała ciekłe powinny być usunięte automatycznie na zewnątrz.

Jest również celowe, aby gaz po przejściu przez wkład filtrujący mógł częściowo przepływać przez wkład dodatkowy, nasycony substancją chemiczną reagującą zmianą koloru na stopień wilgotności gazu. Najczęściej jest stosowane nasylenie wkładu bawełnianego chlorkiem kobaltowym, zmieniającym zabarwienie z niebieskiego na żółty przy przepływie wilgotnego powietrza.

Obecnie najczęściej są stosowane w takim zastosowaniu filtry z pojedynczym wkładem filtrującym. Gaz wewnątrz filtru w specjalnej kierownicy uzyskuje wirowy kierunek ruchu. Pod wpływem sił odśrodkowych, zanieczyszczenia i wydzielające się krople cieczy są odrzucane na ścianki zbiornika, gdzie utrzymują się dopóty, dopóki nie zbiorą się większe krople, które mogą pod wpływem własnego ciężaru spłynąć na dno zbiornika pod przysłonę, gdzie panuje strefa spokoju. Otwarcie zaworu spustowego umożliwia usunięcie zanieczyszczeń i cieczy na zewnątrz. Gaz po zawirowaniu przepływa przez element filtrujący do otworu wylotowego. W pewnych odmianach tych filtrów gaz po przejściu przez element filtrujący jest kierowany do drugiego zbiornika, zwykle umieszczonego w górnej części filtru, gdzie przepływa przez układ najczęściej bawełniany nasycony substancją chemiczną, która zmienia kolor przy przepływie powietrza wilgotnego. Filtry te wykazują wady polegające na tym, że wytrącone krople utrzymują się przez długi okres czasu w strefie przepływu gazu i mogą być ponownie porywane przez gaz kierujący się w stronę wkładu filtracyjnego, co będzie powodować przedostawanie się wilgoci do odbiorników sprężonego gazu. Przepływ całego strumienia gazu przez dodatkowy wkład bawełniany, szczególnie przy większych natężeniach przepływu, może powodować odrywanie się poszczególnych włókien i przedostawanie ich również do odbiorników. Przepływ całego strumienia przez taki dodatkowy wkład

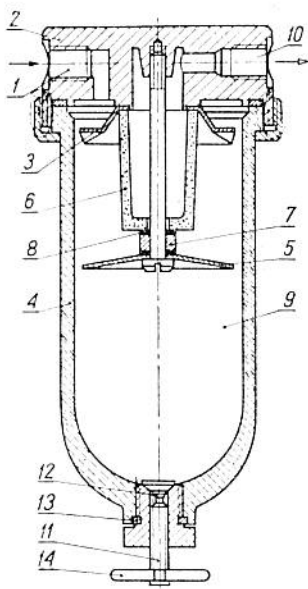
zwiększa opory przepływu przez filtr, co jest niekorzystne w pracy urządzeń pneumatycznych.

Możliwość tylko ręcznego otwierania zaworu spustowego w celu odprowadzenia wydzielonej cieczy powoduje, że przy nie stosownym dozorze może w filtrze zebrać się nadmierna ilość cieczy, która będzie ponownie porywana do przepływającego gazu.

3.3.2 Opis konstrukcji filtrów pneumatycznych

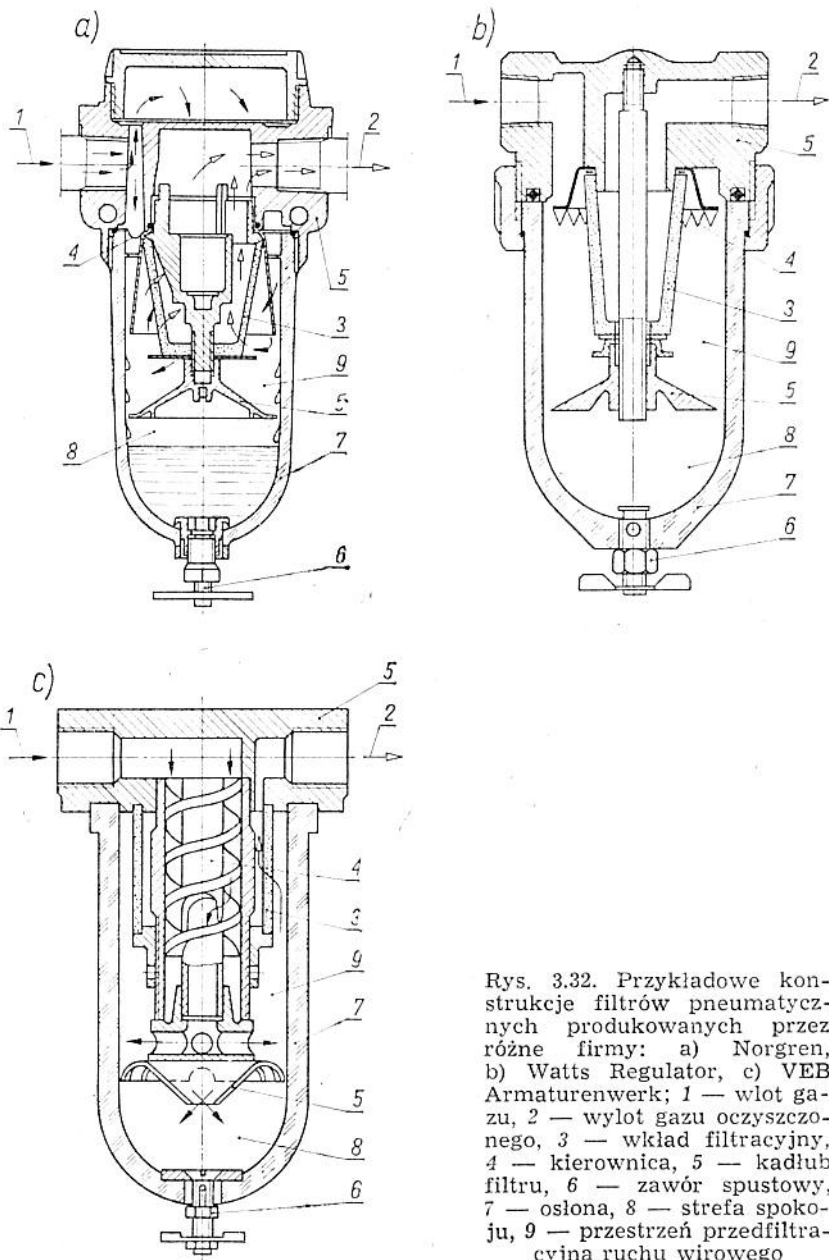
Przedstawimy tutaj niektóre rozwiązania konstrukcyjne filtrów stosowanych w typowych instalacjach pneumatycznych ze zwróceniem uwagi na filtry krajowe.

Na rys. 3.31 pokazano jedną z takich konstrukcji. Sprężony gaz jest doprowadzany przez otwór wlotowy 1 w kadłubie 2. Kierownica przepływu 3 powoduje zawirowanie gazu w zbiorniku 4



Rys. 3.31. Schemat filtru pneumatycznego

oraz wytrącenie zanieczyszczeń i kropeł wilgoci, które osiadają na ściankach zbiornika. Zanieczyszczenia te i krople wilgoci opadają po pewnym czasie pod przesłonę główną 5 do strefy spokoju 9 w zbiorniku. Przesłona jest umieszczona w pewnej odległości od wkładu filtracyjnego 6 co zapewnia tuleja dystansowa 7



Rys. 3.32. Przykładowe konstrukcje filtrów pneumatycznych produkowanych przez różne firmy: a) Norgren, b) Watts Regulator, c) VEB Armaturenwerk; 1 — wlot gazu, 2 — wylot gazu oczyszczonego, 3 — wkład filtracyjny, 4 — kierownica, 5 — kadłub filtru, 6 — zawór spustowy, 7 — osłona, 8 — strefa spokoju, 9 — przestrzeń przedfiltracyjna ruchu wirowego

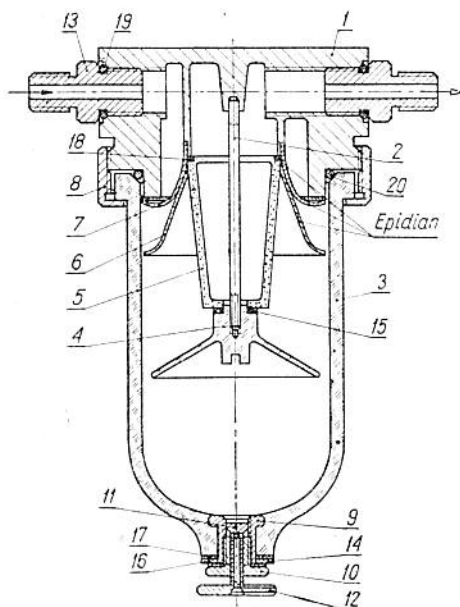
i uszczelnienia 8. Sprężony gaz przepływa przez element filtrujący 6 i jest kierowany do otworu wylotowego 10. W niektórych odmianach znanych konstrukcji filtru, gaz po przejściu przez element filtrujący jest kierowany do zbiornika górnego (nie pokazanego na tym rysunku), gdzie przepływa przez dodatkowy wkład bawełniany nasycony substancją chemiczną reagującą zmianą koloru na stopień wilgotności gazu, a dopiero następnie jest kierowany do otworu wylotowego. W dolnej części zbiornika 4 znajduje się zawór spustowy 11, umieszczony w oprawie 12 uszczelnionej za zbiornikiem pierścieniem 13, otwierany i zamykany ręcznie pokrętłem 14 najczęściej za pomocą mechanizmu śrubowego. Otwarcie zaworu umożliwia usunięcie zanieczyszczeń i ciał ciekłych na zewnątrz.

Na rys. 3.32 przedstawiono trzy przykładowe schematy konstrukcji filtrów pneumatycznych. Na uwagę zasługuje filtr VEB Armaturenwerk Dippoldiswalde (NRD), w którym zastosowano oryginalne rozwiązanie cyklonu gazowego. Przez wlot 1 powietrze dostaje się do kierownicy 4 w postaci komory ze śrubowym trzpieniem. Wskutek ruchu wirowego zanieczyszczenia i krople wody są odrzucone na boki i opadają na dno komory, a stąd wycięciami (niewidocznymi na rysunku) do przestrzeni 9 i na dno osłony 7, skąd są usuwane okresowo przez obrót zaworu 6. Oczyszczzone powietrze wydostaje się przez wkład 3 filtracyjny (z materiału spiekanego) do wylotu 2. Wykonanie osłony 7 z materiału przezroczystego umożliwia obserwację poziomu wody i zanieczyszczeń w filtrze.

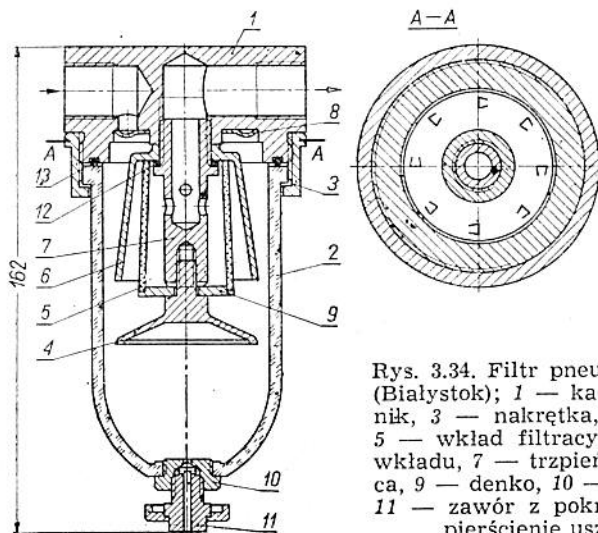
Zaleca się nie stosować obudowy z tworzywa sztucznego filtrów w przypadku, gdy powietrze filtrowane pochodzi ze sprężarki smarowanej olejem zawierającym ester fosforowy lub węglowodory chlorowane. W takim przypadku należy stosować wyłącznie obudowę metalową filtru.

Przed zainstalowaniem filtru należy otworzyć przewód zasilający powietrza w celu wydmuchnięcia z niego zanieczyszczeń. Wskazane jest instalowanie filtru prostopadle do przewodu, tak aby powietrze wpływało prosto do filtru, oraz możliwie najbliżej urządzenia zasilanego, jednak zawsze przed regulatorem ciśnienia.

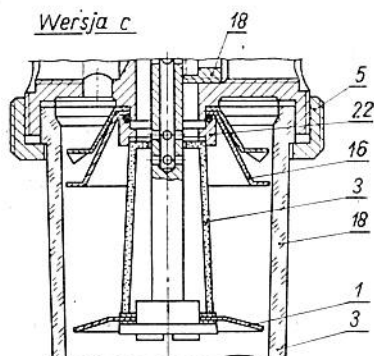
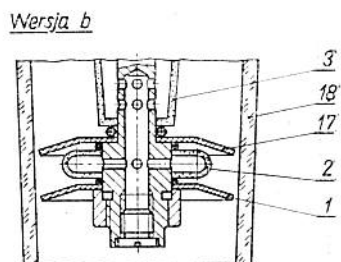
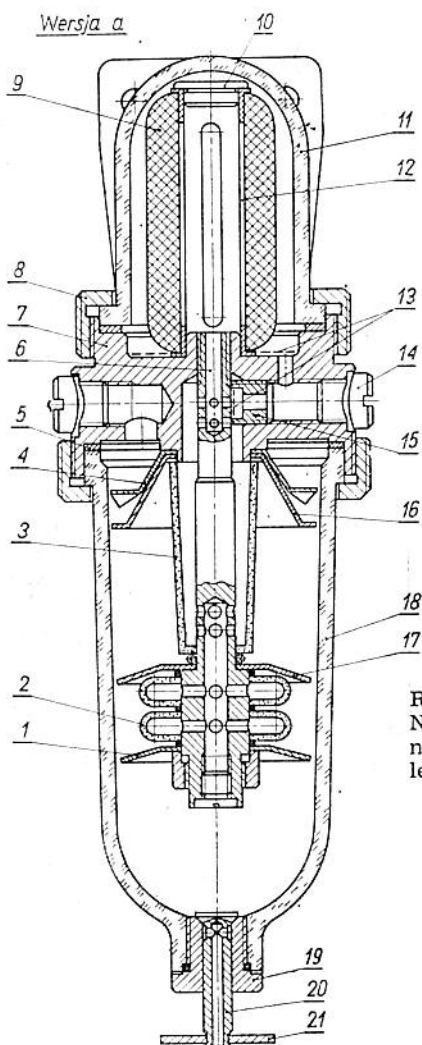
Krajowe konstrukcje filtrów pneumatycznych pokazano na rys. 3.33, 3.34 i 3.35. Na szczególną uwagę zasługuje konstrukcja opracowana w Instytucie Automatyki Przemysłowej PW przedstawiona na rys. 3.35. Główną cechą tego filtru jest to, że wkład filtrujący 5, 6 jest wykonany jako dwuczęściowy, umieszczony jeden pod drugim, i przedzielony przesłoną pomocniczą 17. Opór przepływu przez dolny wkład 2 jest mniejszy niż przez wkład górny 3. Wskutek tego przepływający gaz ma pionową składową



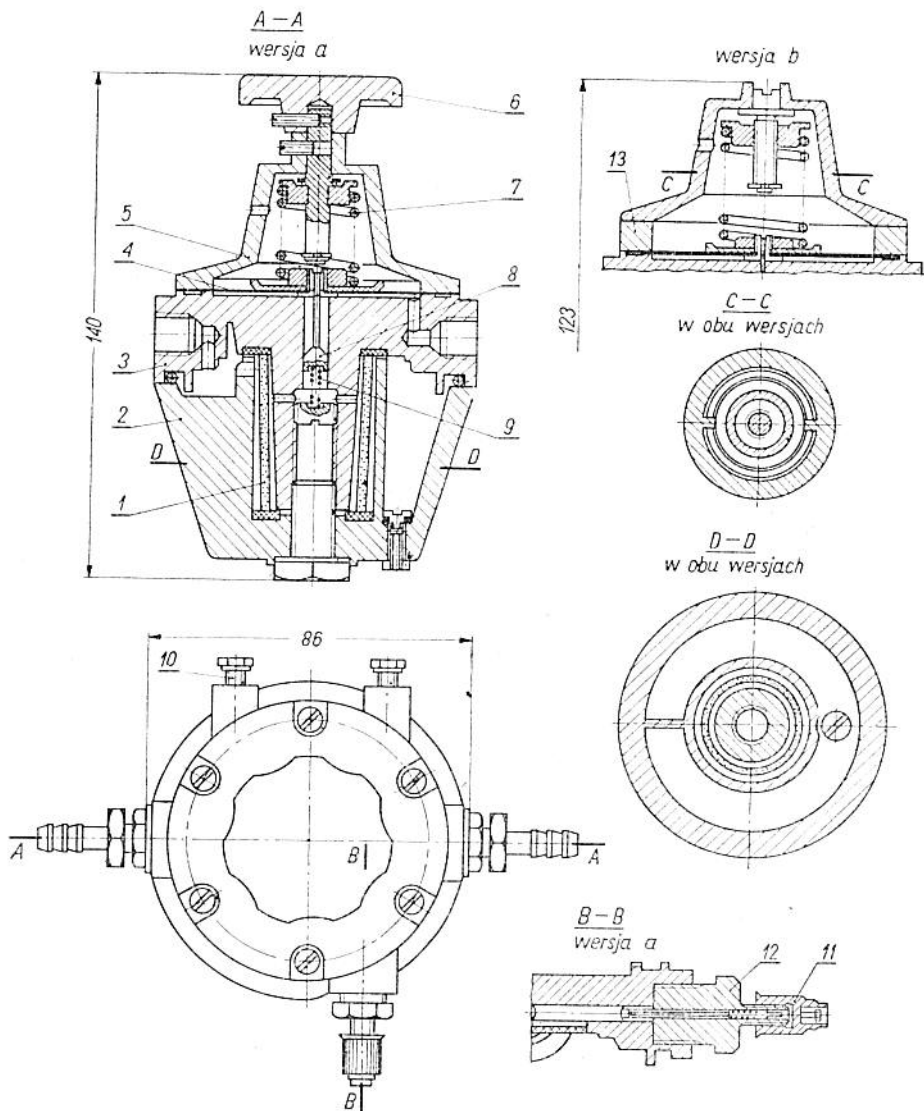
Rys. 3.33. Filtr pneumatyczny ODO (PAP Falenica); 1 — kadłub, 2 — trzpień, 3 — zbiornik, 4 — przesłona, 5 — wkład filtracyjny, 6 — deflektor, 7 — kierownica, 8 — nakrętka, 9 — obsada tulei, 10 — tuleja prowadzenia zaworu, 11 — zawór, 12 — pokrętło zaworu, 13 — końcówka, 14 — podkładka, 15—20 — pierścienie uszczelniające



Rys. 3.34. Filtr pneumatyczny PNHD (Białystok); 1 — kadłub, 2 — zbiornik, 3 — nakrętka, 4 — przysłona, 5 — wkład filtracyjny, 6 — osłona wkładu, 7 — trzpień, 8 — kierownica, 9 — denko, 10 — obsada zaworu, 11 — zawór z pokrętłem, 12, 13 — pierścienie uszczelniające



Rys. 3.35. Filtr pneumatyczny NFP2 (IAP PW); 1 — przesłona, 2 — wkład filtracyjny talerzowy, 3 — wkład filtracyjny garnkowy, 4 — kierownica, 5, 8 — nakrętki zamocowujące zbiorniki, 6 — trzpień, 7 — kadłub filtru, 9 — wkład wskaźnika wilgotności, 10 — korek, 11, 18 — zbiorniki, 12 — tuleja, 13 — sito metalowe, 14 — korek transportowy, 15 — dławik, 16 — przysłona, 17 — przesłona pomocnicza, 19 — kadłub zaworu, 20 — zawór, 21 — pokrętko, 22 — tuleja



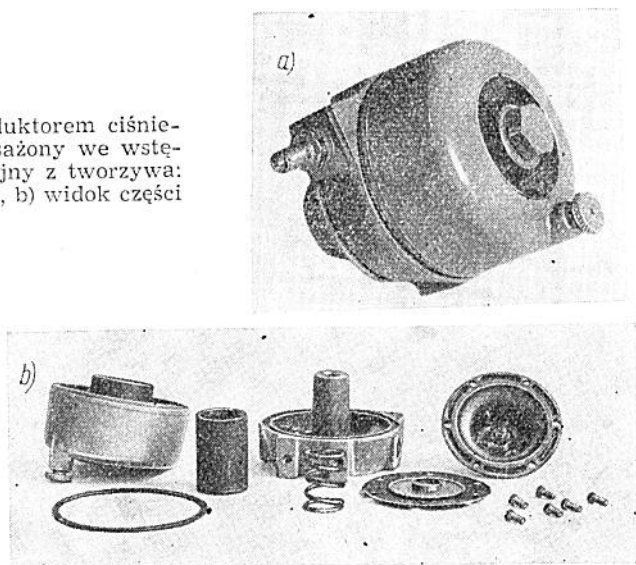
Rys. 3.36. Filtr pneumatyczny z reduktorem ciśnienia (KFAP); 1 — wkład filtracyjny, 2 — zbiornik, 3 — kadiub, 4 — przepona, 5 — pokrywa, 6 — pokrętło, 7 — sprężyna, 8 — iglica, 9 — sprężyna, 10 — śruba zamocowująca, 11 — osłona końcówki, 12 — obsada zaworu, 13 — tuleja odległościowa

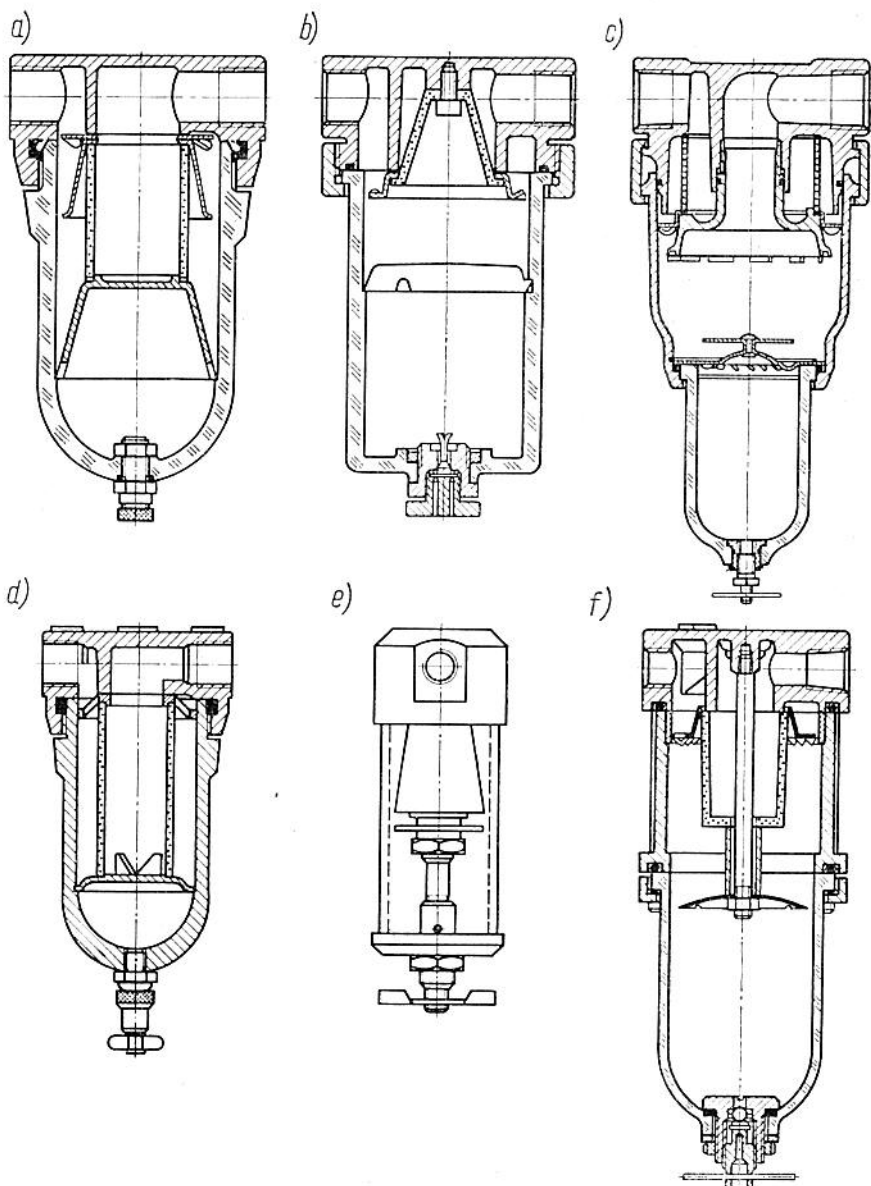
prędkości skierowaną ku dołowi, co powoduje, że wytrącne krop-
le wilgoci na ścianie zbiornika 18 są energicznie spychane rów-
nież ku dołowi pod przysłonę główną 1 na dno zbiornika. Znaj-
dujący się tu zawór spustowy 20 jest wykonany z centralnym
otworem zamykanym elementem stożkowym dociskany do otwo-
ru korpusu 19 przez pokręcenie pokrętłem 21.

W konstrukcji filtra zastosowano dodatkowo wkład baweł-
niany 9 osadzony na tulei 12, nasycony substancją chemiczną
zmieniającą kolor (chlorek kobaltowy) w zależności od zawartości
wilgoci w przepływającym powietrzu. W kadłubie filtra znajdują
się dwa kanały do przepływu gazu po przejściu przez wkłady fil-
trujące 2.3. Część gazu jest skierowana jednym kanałem do otwo-
ru wylotowego przez dławik 15, natomiast pozostała część prze-
pływa przez dodatkowy wkład bawełniany 9 nasycony substancją
chemicznie czułą na wilgotność gazu, a następnie jest kierowana
do otworu wylotowego. Opór przepływu w takiej konstrukcji fil-
tru jest niewiele większy niż w odmianie filtra bez wkładu baweł-
nianego, przy czym włókna z wkładu bawełnianego nie są wy-
mywane przez przepływający gaz ze względu na niewielkie na-
tężenie przepływu. W obu kanałach wylotowych są umieszczo-
ne jeszcze dodatkowe elementy filtracyjne z sita metalowego 13
bezpośrednio przed otworem wylotowym.

Przykład zablokowanej konstrukcji filtra pneumatycznego
z reduktorem stabilizującym ciśnienie w linii zasilania pokazano
na rys. 3.36. Zespoły takie są wykonywane w różnych odmianach

Rys. 3.37. Filtr z reduktorem ciśnie-
nia (Foxboro) wyposażony we wstę-
gowy wkład filtracyjny z tworzywa:
a) widok zewnętrzny, b) widok części





Rys. 3.38. Typowe konstrukcje filtrów pneumatycznych uwzględniające sposoby zamocowania wkładów filtracyjnych, kierownic oraz przesłon; a, b) Oleoflux seria 200 i 500, c) Norgren, d) Walther Präzision, e) Bosch Pneumatic, f) radziecka

wyposażonych np. dodatkowo w manometr lub pozbawionych pokrętła ręcznego do nastawiania ciśnienia itp. Metalowy wkład spiekany zastosowany w tej konstrukcji umożliwia łatwą jego regenerację. Przykładem filtra zwartej konstrukcji z reduktorem ciśnienia i wkładem filtracyjnym wykonanym z cylindrycznie nawiniętej wstęgi z tworzywa jest zespół filtra firmy Foxboro pokazany na rys. 3.37 w widoku zewnętrznym oraz po rozmontowaniu.

Filtry pneumatyczne są wykonywane w rozmaitych wariantach z punktu widzenia usytuowania i montowania wkładów filtracyjnych. Nie ma dotychczas ścisłych zaleceń określających konstrukcyjne wymagania w tym zakresie. Projektanci filtrów pneumatycznych kierują się zazwyczaj zasadą, wg której stosunek objętości komory przed i za wkładem filtracyjnym powinien być możliwie duży przy danej średnicy przewodu doprowadzającego. Stosunek ten zależy również od dopuszczalnych natężeń przepływu, spodziewanego stopnia zanieczyszczenia gazu roboczego, konstrukcji i umiejscowienia kierownic oraz budowy wkładu filtracyjnego. Przykłady konstrukcji filtrów pneumatycznych przedstawione na rys. 3.38 uwidaczniają szczegóły budowy, jak również mogą być pomocą przy wyborze schematu konstrukcyjnego. Stosowane przeważnie wkłady filtracyjne ze spieków metalowych lub tworzyw sztucznych o kształtach cylindrycznych lub garnkowych są stosunkowo rzadko zastępowane wkładami talerzowymi.

Oryginalne rozwiązanie z zastosowaniem kilku segmentów talerzowych w filtrze pneumatycznym pokazano na rys. 3.39.

3.3.3. Zestaw oczyszczania powietrza z cyklonem gazowym

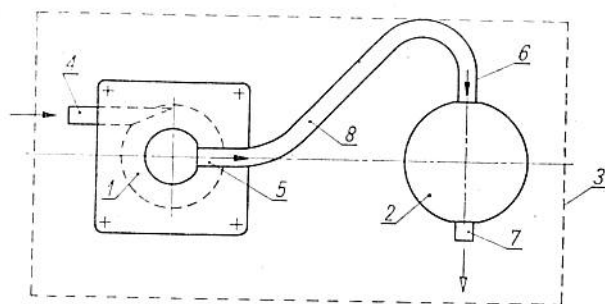
W przypadku konieczności usuwania znacznych ilości wody przy dużej koncentracji zanieczyszczeń mechanicznych, występujących np. w instalacjach górniczych, są budowane zestawy oczyszczania wyposażone dodatkowo na wejściu powietrza w cyklon gazowy. Opisany tutaj zestaw oczyszczania powietrza (ZOP) jest urządzeniem do usuwania z powietrza wody, pary wodnej, większych cząstek ciał stałych i pyłów. Zestaw oczyszczania powietrza ZOP1 jest zbudowany z dwóch zasadniczych zespołów: cyklonu gazowego i filtra powietrza (rys. 3.40).

Cyklon gazowy przedstawiony schematycznie na rys. 3.41 stanowi pierwszy stopień zestawu oczyszczającego. Jego działanie jest następujące. Zanieczyszczone powietrze dostaje się kanałem wlotowym I. Skośnie ścięty i stycznie połączony z segmentem walcowym koniec kanału powoduje, że powietrze wpływają-



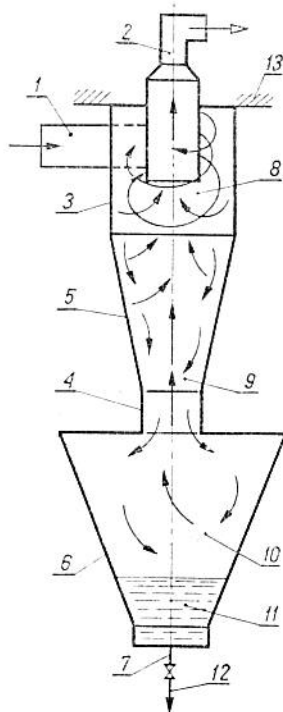
Rys. 3.39. Widok filtra pneumatycznego z zastosowaniem talerzowych segmentów filtracyjnych wykonanych ze spieków metalowych (Koprotech)

ce do cyklonu podlega zawirowaniom. Wskutek dużej różnicy średnic kanału wlotowego i segmentu walcowego następuje również nagle rozprężenie powietrza i spadek temperatury, co powoduje skroplenie pary wodnej. Na skutek zawirowania powietrza duże cząstki ciał stałych, pyły, skroplona para oraz ewentualne „korki” wodne podlegają działaniu siły odśrodkowej i osiadają na ściankach cyklonu. Wstępnie oczyszczone powietrze dostaje się do kanału wylotowego, którego wejście znajduje się poniżej kanału



Rys. 3.40. Schemat łączenia zespołów zestawu oczyszczania powietrza (widok z góry); 1 — cyklon gazowy, 2 — filtr powietrza, 3 — zarys półki, pod którą są zmontowane zespoły zestawu, 4 — kanał wlotowy cyklonu, 5 — kanał wylotowy cyklonu, 6 — kanał wlotowy filtra, 7 — kanał wylotowy filtra, 8 — przewód giętki łączący cyklon z filtrem

wlotowego. Właściwe wzajemne położenie kanału wlotowego i wylotowego ma istotny wpływ na stopień oczyszczania powietrza w cyklonie. Pyły i woda spływają po ściankach do dolnych partii cyklonu. Na skutek różnych kształtów i zmian pola przekroju cyklonu na całej jego wysokości, prędkości przepływającego powietrza nie są jednakowe. W górnej części cyklonu powietrze przepływa z dużą prędkością i podlega zawirowaniu. W dolnej części, w tak zwanej *strefie spokoju*, powietrze przepływa z niewielką prędkością i bez zawirowań. W strefie spokoju i w środkowej stre-



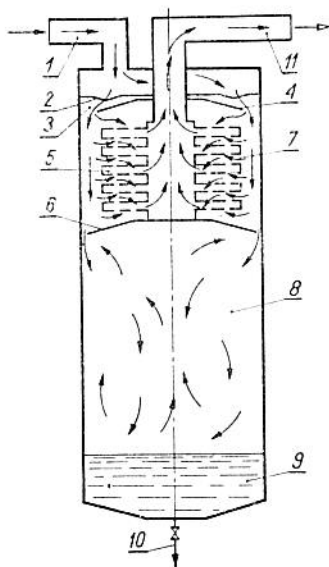
Rys. 3.41. Schemat cyklonu gazowego zestawu ZOPI; 1 — kanał wlotowy, 2 — kanał wylotowy, 3 — segment walcowy górny, 4 — segment walcowy dolny, 5 — segment stożkowy górny, 6 — segment stożkowy dolny, 7 — zawór, 8 — strefa zawirowania, 9 — strefa przejściowa, 10 — strefa spokoju, 11 — kondensat, 12 — sływ kondensatu, 13 — płyta nośna

fie przejściowej występuje dodatkowo wytrącanie większych cząstek stałych i pyłów z przepływającego powietrza. Woda i zanieczyszczenia w postaci ciał stałych gromadzą się w dolnej części cyklonu nad gniazdem zaworu. Cyklon opróżnia się z nagromadzonej wody okresowo przez pokręcenie pokrętła zamocowanego na trzpieniu grzybka. Grzybek unosi się wówczas do góry, a woda pod wpływem siły ciężkości i ciśnienia istniejącego w cyklonie, spływa kanałami pod grzybką do środkowego kanału, usytuowanego osiowo w trzpieniu grzybka i wydostaje się na zewnątrz.

O całkowitym opróżnieniu cyklonu z wody sygnalizuje wypływające z charakterystycznym „świsem” powietrze. Należy wówczas zamknąć zawór przez pokręcenie pokrętła. Przy dużej zawartości wody w powietrzu i dopuszczalnych nieszczelnościach instalacji można pozostawić zawór niedomknięty.

Zawór ręczny może być zastąpiony automatem spustowym, który działa samoczynnie w miarę gromadzenia się kondensatu w cyklonie. Automat spustowy jest umocowany do końcówki cyklonu za pomocą nakrętki z kołnierzem w sposób identyczny jak gniazdo zaworu ręcznego.

Filtr powietrza przedstawiony schematycznie na rys. 3.42 jest drugim z kolei zespołem po cyklonie gazowym wchodzącym w zestaw oczyszczania powietrza. W filtrze następuje dokładne oczyszczenie powietrza z pyłów i kropeł wody. Filtr jest zbudowany w postaci walcowej kolumny. Działanie jego jest następujące. Powietrze płynące przewodem z cyklonu dostaje się kanałem wlotowym 1 do walcowej komory kadłuba. W komorze następuje rozprężenie powietrza i skroplenie pary wodnej. Następnie powietrze przepływa przez kierownicę 2 do strefy zawirowania 3 znajdującej się nad deflektorem górnym 4. Kształt i ustawienie łopatek kierownicy 2 powodują, że powietrze podlega zawirowaniom. Wskutek zawirowania cząstki ciał stałych i woda podlegają działaniu siły odśrodkowej i osiadają na ściankach. Powierzchnia stożkowa deflektora 4 kieruje masy powietrza w dół wzdłuż powierz-



Rys. 3.42. Schemat filtra powietrza zestawu ZOP1

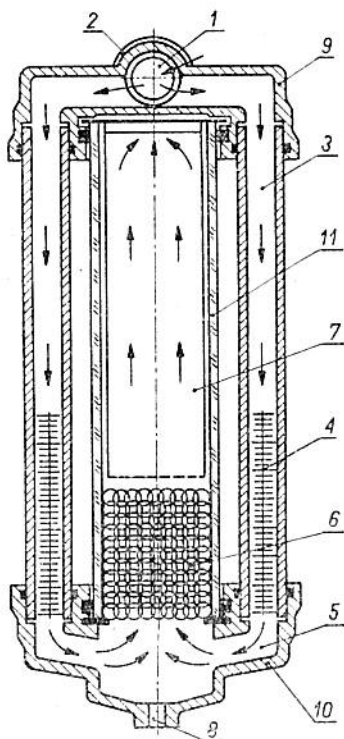
chni walcowej segmentu walcowego. Powietrze ma możliwość opuszczenia filtru tylko przez płyty segmentów filtracyjnych 5 ułożonych pomiędzy deflektorem górnym 4 a dolnym 6. Przepływająca przez warstwy filtrujące 7 powietrze podlega oczyszczeniu z pyłów, a następnie przepływa częścią środkową segmentów filtracyjnych 5 do góry kanału wylotowego 11 i przewodem do odbiornika. Cząstki ciał stałych i krople wody spływają po ściankach walcowych komory i po powierzchni stożkowej deflektora dolnego 6 do dolnych części filtru. W objętości filtrującej powietrze przepływa z dużą prędkością zmieniając kierunek od powierzchni walcowej komory do powierzchni płyt filtrujących, a następnie wpływa do kanału wylotowego 11. W odstożniku w strefie spokoju 8 powietrze przepływa z małymi prędkościami, a deflektor dolny 6 zapobiega porywaniu cząstek ciał stałych i wody do objętości filtrującej 7, znajdującej się między deflektorami. Woda 9 i cząstki ciał stałych gromadzące się w dolnych częściach odstożnika są usuwane okresowo na zewnątrz za pomocą zaworu ręcznego 10, podobnie jak w cyklonie powietrza. Zawór ręczny może być zastąpiony automatem spustowym, który automatycznie usuwa gromadzącą się w odstożniku kondensat.

3.3.4 Inne konstrukcje filtrów powietrza

Filtry odoliwiające. Ze względu na różnorodne zastosowanie gazów roboczych są konieczne poszukiwania takich rozwiązań konstrukcyjnych, które zapewniłyby uzyskanie określonej czystości powietrza. Jednym z najważniejszych zagadnień w zakresie oczyszczania powietrza jest usunięcie par i cząstek ciekłych olejów oraz równocześnie zapewnienie wysokiej efektywności usuwania zanieczyszczeń mechanicznych. To zadanie najlepiej spełniają *filtry mechaniczno-chemiczne*. Przykładem rozwiązania konstrukcyjnego takiego filtru jest filtr odoliwiający produkowany przez firmę Electro-Chemical Eng. Co. Ltd., Deltech Div (rys. 3.43). Filtr ten jest przeznaczony głównie do usuwania oleju, skondensowanej wody i innych ciekłych oraz stałych zanieczyszczeń z powietrza. Filtr wyposażony we wkład absorbujący charakteryzuje się wyjątkową efektywnością usuwania zanieczyszczeń: wynosi ona 99,4% dla cząstek oleju o wielkości 0,5 μm , ponad 99,9% dla lotnych popiołów oraz 98,9% dla cząstek pyłu o wielkości 0,6 μm .

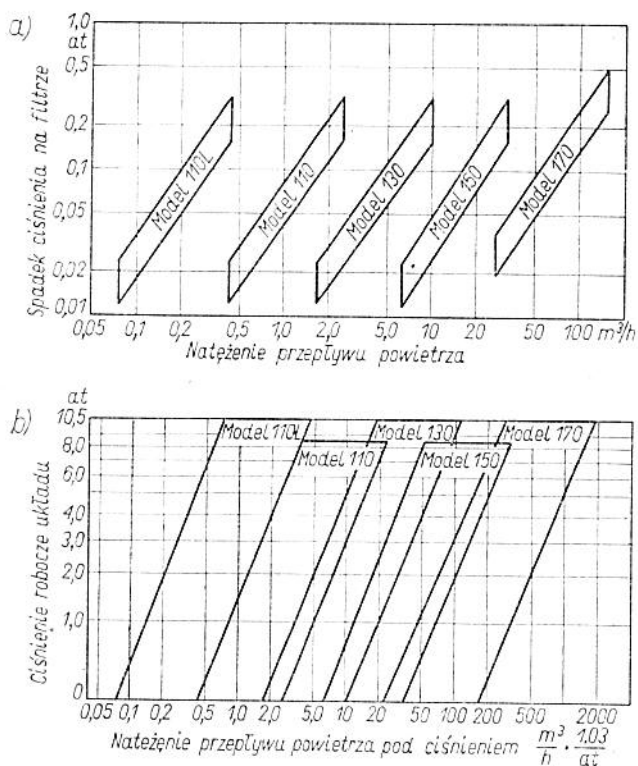
Filtr działa w ten sposób, że w pierwszej fazie przepływu powietrza następuje filtrowanie gazodynamiczne, uderzeniowe, a następnie filtrowanie mechaniczno-chemiczne podczas przepływu przez ziarnistą warstwę specjalnego materiału absorbującego olej. Jednocześnie z pracą filtru, następuje wskazywanie stopnia za-

nieczyszczenia wkładu, który umieszczony w przezroczystej obudowie zmienia zabarwienie z różowego na czerwone w miarę absorpcji oleju. Zmiana barwy wkładu na całej wysokości przepływu sygnalizuje o konieczności jego wymiany.



Rys. 3.43. Odoliwiający filtr powietrza (Deltech); 1, 2 — wlot i wylot powietrza, 3 — kanał zmiany kierunku przepływu, 4 — powierzchnia uderzenia, 5 — przestrzeń zmniejszenia prędkości przepływu, 6 — oddzielnik mgły, 7 — wkład absorbujący olej, 8 — kanał drenażowy, 9, 10 — pokrywy górna i dolna wykonane z aluminium lub stali kadmowej, 11 — rura z tworzywa akrylanowego

Na rys. 3.44 pokazano charakterystyki przepływowe kilku modeli filtrów Deltech i sposoby ich doboru w zależności od zastosowań. Należy zaznaczyć, że ustalenie wielkości filtru zależy od prędkości przepływu i ciśnienia roboczego układu. Jeżeli rzeczywisty przepływ będzie większy niż nominalny, działanie filtru będzie krótsze ze względu na zmniejszenie efektywności filtrowania energetycznego i zwiększenie obciążenia wkładu absorbującego. Filtry odoliwiające Deltech nie zmieniają w zasadzie oporów prze-



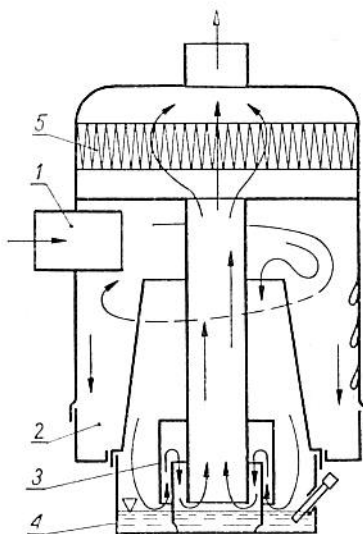
Rys. 3.44. a) Charakterystyki przepływowe odoliwiających filtrów Deltech, b) wykresy doboru filtrów zależnie od ciśnień roboczych i natężeń przepływu

plywu w czasie pracy. Nie zaleca się stosowania tych filtrów w normalnej akrylanowej obudowie w przypadku istnienia zanieczyszczeń olejowych syntetycznych typu estrów fosforowych, rozpuszczalników zawierających związki aromatyczne i węglowodory chlorowane, acetonu, ketonu i rozpuszczalników lakierów.

Filtry „mokre” powietrza. Usunięcie z powietrza roboczego dużej zawartości zanieczyszczeń stałych jest możliwe i skuteczne tylko wtedy, gdy wkład filtracyjny ma znaczną powierzchnię, aby zmiana oporów przepływu nie następowała zbyt szybko. W wielu przypadkach rozwiązanie takie jest niecelowe ze względu na nadmierne rozbudowanie filtru. Najczęściej spotykanymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi stosowanymi w ciężkich warunkach zapylenia są wielostopniowe filtry powietrza działające z wykorzystaniem różnych zasad. W większości takich filtrów wykorzystuje się

uderzenie przepływającego powietrza w przegrodę ciekłą. Stąd też nazwa filtry „mokre” powietrza.

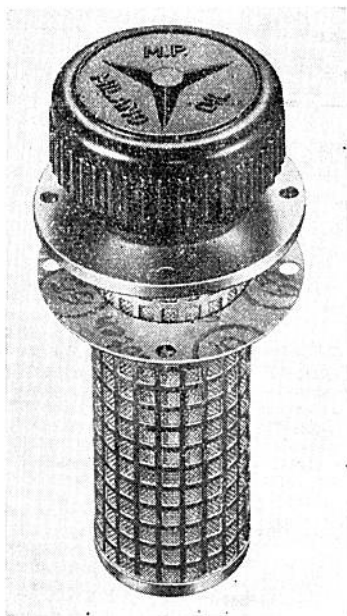
Typową konstrukcję filtru „mokrego” przeznaczanego do pracy w samochodach ciężarowych przedstawiono na rys. 3.45. Jest to trzystopniowy filtr oczyszczania powietrza. Działanie filtru jest następujące. Przez otwór wlotowy 1 wpadające powietrze ulega zawirowaniu, wskutek czego duże cząstki zanieczyszczeń stałych



Rys. 3.45. Trzystopniowy filtr „mokry” powietrza przeznaczony do pracy na samochodach ciężarowych

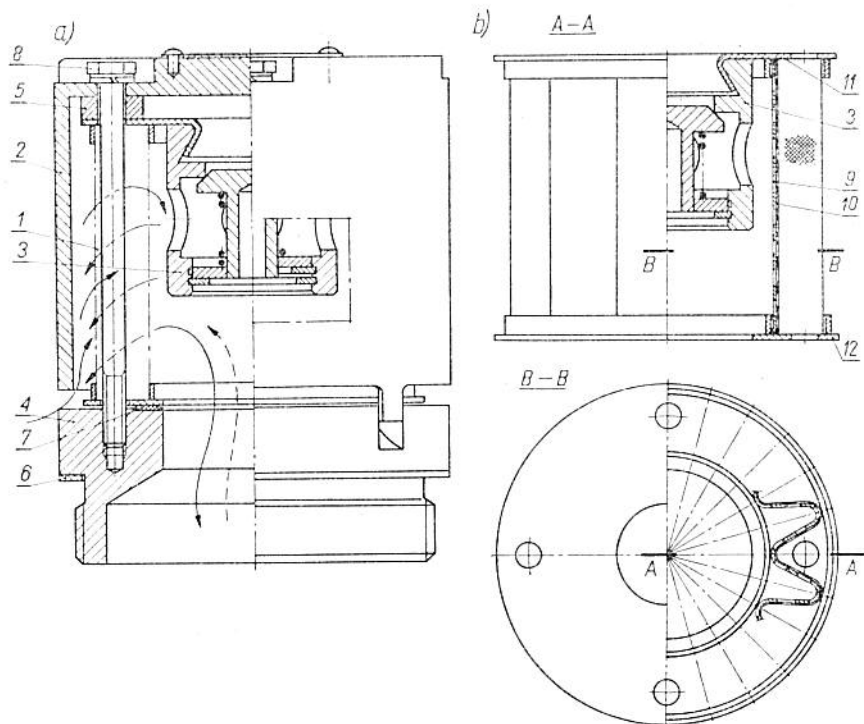
opadają na dno osadnika 2. Z tego pierwszego stopnia oczyszczania powietrze zostaje skierowane wzdłuż przegrody 3 zmieniającej kierunek jego przepływu do miski 4 napełnionej olejem, w której uderza o powierzchnię oleju i traci znaczną część cząstek zanieczyszczeń. Jest to drugi stopień oczyszczania. Stąd powietrze wraz z częściowo powstałą i zabieraną mgłą olejową przechodzi do ostatniego, trzeciego stopnia wykonanego w postaci przegrody porowatej 5, np. z sita filtrującego. W podobny sposób działa trzystopniowy filtr powietrza produkowany przez ZSM Sędziszów Młp., oznaczony symbolem G50.15.00. Ma on następujące dane techniczne: spadek ciśnienia ok. 45 mm H₂O przy natężeniu przepływu powietrza 3000 l/min, zdolność zatrzymywania zanieczyszczeń min 95% ciężarowo, masa max. pochłoniętych zanieczyszczeń ok. 0,5 kg przy 1,3 kg oleju w misce filtru, masa całkowita filtru 5,75 kg.

Filtry pomocnicze instalowane w pokrywach zbiorników. Filtry te służą do odpowietrzania i jednocześnie filtrowania powietrza oraz do wlewania cieczy roboczej. Stosowane są dwa rozwiązania konstrukcyjne. Pierwsze z nich polega na wbudowaniu oddzielnie filtra powietrza i oddzielnie wkładu filtracyjnego wlewowego, natomiast drugie rozwiązanie stanowi konstrukcyjny zespół filtra wlewowego i odpowietrzającego. Drugie rozwiązanie stosowane w małych i średnich zbiornikach cieczy jest przykładem zwartej budowy. Najczęściej pokrywa filtra wlewowego jest wyposażona we wkład filtracyjny powietrza, wykonany z tworzywa porowatego ($40 \mu\text{m}$) lub sita metalowego. Przy występujących w zbiornikach różnicach ciśnień wynikających z ruchu lustra cieczy, natężenia przepływu przez filtr odpowietrzający wynoszą powyżej $1 \text{ m}^3/\text{min}$. Widok zewnętrzny zespołu filtra odpowietrzającego (nakrętka) i filtra wlewowego pokazano na rys. 3.46. Jest to zespół 102 firmy MP Filtri Per Oleodinamica (Włochy). Filtry odpowietrzające stosuje się w hydraulicznych urządzeniach pracujących w wyjątkowo ciężkich warunkach, a szczególnie w maszynach budowlanych, drogowych i ciągnikach oraz w tych zakładach produkcyjnych, w których występuje znaczne zapylenie atmosfery otaczającej (cementownie, kopalnie, huty).



Rys. 3.46. Filtr powietrza i filtr wlewowy zbiorników cieczy roboczej

Filtry odpowietrzające i filtrujące autonomiczne wbudowane w zbiorniki o dużej objętości cieczy lub w zbiorniki narażone na bardzo silne zanieczyszczenie zewnętrzne i możliwości oddziaływań niszczących są wyposażone w zawory bezpieczeństwa oraz osłony metalowe zabezpieczające. Konstrukcję takiego filtra w układzie siatkowym przedstawiono na rys. 3.47. Jest to filtr opracowany w dwu odmianach przez OKH-WSK Wrocław z wkładem siatko-



Rys. 3.47. Filtr powietrza zbiornika hydraulicznego z wkładem siatkowym i zaworem bezpieczeństwa: a) widok ogólny, b) widok zespołu filtrującego; 1 — zespół filtrujący, 2 — osłona, 3 — zespół zaworu, 4 — podstawa, 5 — tuleja odległościowa, 6, 7 — pierścienie uszczelniające, 8 — śruba zamocowująca, 9 — ruszt podporowy, 10 — sito filtracyjne, 11 — pokrywa górna, 12 — pokrywa dolna

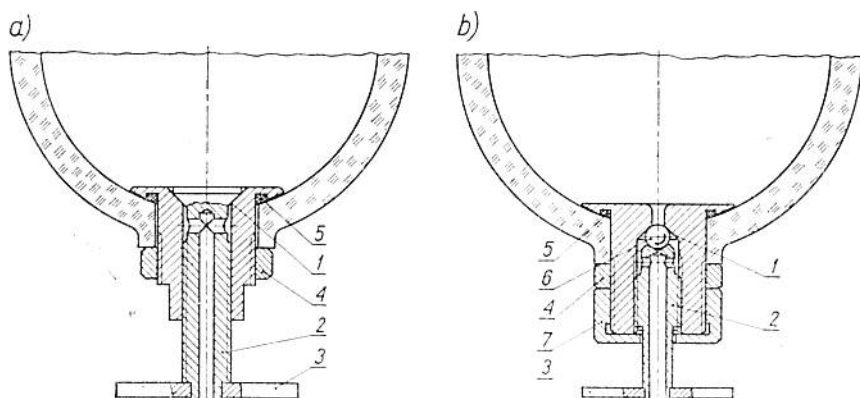
wym oraz z wkładem metalowym ze spiekanej brązu. Dane techniczne tych filtrów są następujące: dokładność filtrowania powietrza $25 \div 100 \mu\text{m}$ zależnie od użytego materiału filtracyjnego, różnice ciśnienia otwierające zawór 0,1 i 0,2 kG/cm², natężenie przepływu nominalne ok. 0,5 m³/min w warunkach normalnych.

3.4. Urządzenia do odprowadzania cieczy filtrów pneumatycznych

Urządzenia do odprowadzania cieczy z odstojnika, będącej głównie kondensatem par, stanowią ważne wyposażenie filtrów pneumatycznych. Urządzenia te w zależności od stopnia automatyzacji czynności odprowadzania cieczy można podzielić na:

- urządzenia do ręcznego odprowadzania cieczy,
- urządzenia do półautomatycznego odprowadzania cieczy,
- urządzenia do automatycznego odprowadzania cieczy o działaniu bezpośrednim i działaniu pośrednim.

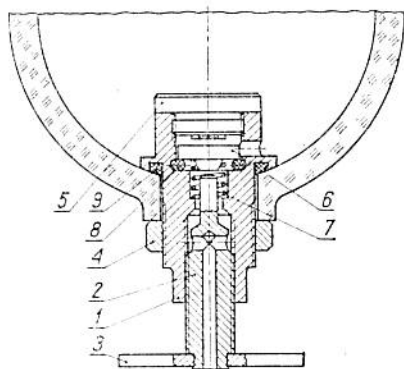
Urządzenia ręcznego odprowadzania cieczy są najbardziej rozpowszechnione wszędzie tam, gdzie ilość zbierającego się kondensatu podczas pracy filtru jest niewielka oraz obsługa ma łatwy dostęp do filtru. Zasadniczym warunkiem jest na ogół wykonanie odstojnika kondensatu z materiału przezroczystego, umożliwiającego łatwą wizualną kontrolę poziomu zebranej cieczy. Warunek ten nie musi być spełniony w większości rozwiązań urządzeń automatycznych, aczkolwiek ze względu na trudności zabezpieczenia wysokiej niezawodności automatów odprowadzania cieczy, przezroczysta osłona umożliwi okresową obserwację działania samego automatu. Z dużej liczby rozwiązań konstrukcyjnych urządzeń do odprowadzania cieczy w filtrach pneumatycznych, wybrano najbardziej typowe. Na rys. 3.48 przedstawiono dwa przykłady zaworów ręcznych. Pierwszy z nich pokazany na rys. 3.48, ma



Rys. 3.48. Ręczne zawory odprowadzania cieczy filtrów pneumatycznych: a) z uszczelnieniem stożkowym, b) z uszczelnieniem kulką; 1 — gniazdo korpusu zaworu, 2 — zawór z otworem spustowym, 3 — pokrętło, 4 — nakrętka zamocowania korpusu zaworu, 5 — uszczelnienie, 6 — kulka, 7 — nakrętka odległościowa

uszczelnienie stożkowe między gniazdem korpusu 1 a zaworem 2; otwarcie zaworu najczęściej następuje przez obrót w prawo pokrętła 3. W drugim rozwiązaniu zastosowano pośrednią kulkę zaciskową 6; otwarcie zaworu następuje przez obrót pokrętła w lewo. Zawór ma dodatkową nakrętkę 7 ograniczającą zakres otwarcia zaworu. Niekiedy kanały odprowadzające zaworów mają zakończenie gwintowane do podłączenia przewodu drenażowego cieczy.

Na rys. 3.49 pokazano przykład konstrukcji zaworu półautomatycznego umożliwiającego samoczynny wypływ zebranej w osadniku cieczy wtedy, gdy w instalacji pneumatycznej nastąpi spadek ciśnienia. W czasie pracy filtra ciśnienie gazu dociska



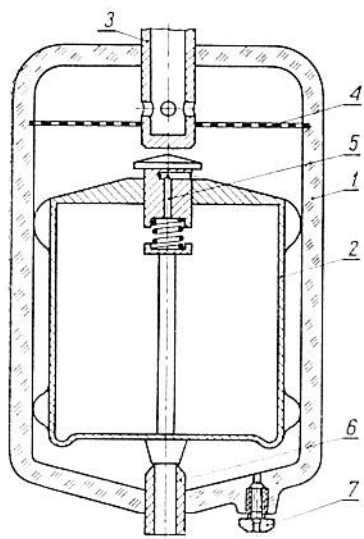
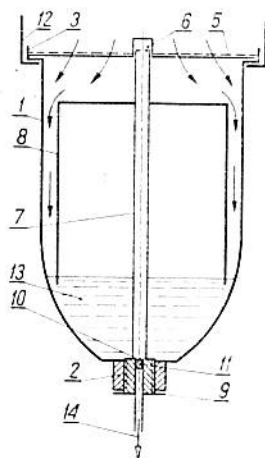
Rys. 3.49. Półautomatyczny zawór odprowadzania cieczy; 1 — korpus, 2 — wkrętka z przewodem, 3 — pokrętło, 4 — nakrętka, 5 — wkręt, 6 — grzybek zaworu, 7 — sprężyna, 8 — uszczelka zaworu, 9 — uszczelnienie korpusu

element 6 zaworu podpartego sprężyną 7, tak że jego dolna część opiera się o uszczelkę 8 i odcina wypływ gazu. Zmniejszenie ciśnienia o wartość umożliwiającą podniesienie zaworu przez sprężynę, powoduje otwarcie kanału wypływu cieczy. W czasie pracy, gdy poziom cieczy nadmiernie wzrasta i nie jest dopuszczalne zmniejszenie ciśnienia gazu, można usunąć ciecz przez obrót wkrętki 2 pokrętłem 3.

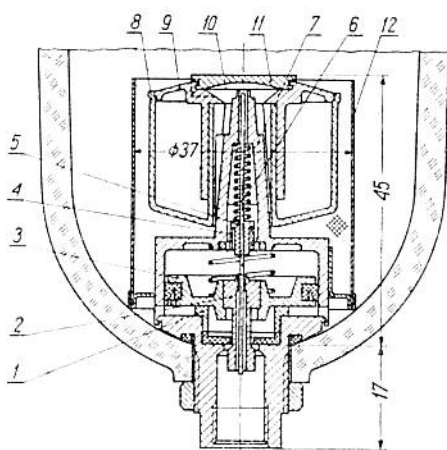
Urządzenia automatyczne do odprowadzania cieczy, tzw. automaty spustowe najczęściej są realizowane przez wykorzystanie energii ciśnienia gazu w instalacji, w której jest umieszczony filtr lub tylko sam automat spustowy, oraz przez wykorzystanie siły wyporu zebranej cieczy dla zadziałania automatu. Przykładem prostej realizacji takiego urządzenia jest automat spustowy AS1 opracowany w IAP PW. Automat spustowy stanowi wyposażenie cyklonu gazowego filtra powietrza będących podstawowymi zespołami zestawu oczyszczania powietrza (ZOP1). Zadaniem automatu jest samoczynne usuwanie wody zbierającej się w dolnych częściach korpusów cyklonu i filtra.

Automat spustowy, przedstawiony schematycznie na rys. 3.50, zastępuje zawór spustowy ręczny. W korpusie 1 automatu w dolnej jego części jest zatopiona wodoodporna tulejka 2 z gwintowanym otworem. Górna część korpusu ma kołnierz 3 z rowkiem na

Rys. 3.50. Schemat automatu spustowego AS1



Rys. 3.51. Automat spustowy z zamkniętą przestrzenią pływaka; 1 — obudowa, 2 — pływak, 3 — króciec łączący z filtrem, 4 — siatka filtracyjna kondensatu, 5 — zawór pływaka, 6 — dysza wypływowa, 7 — zawór spustowy ręczny

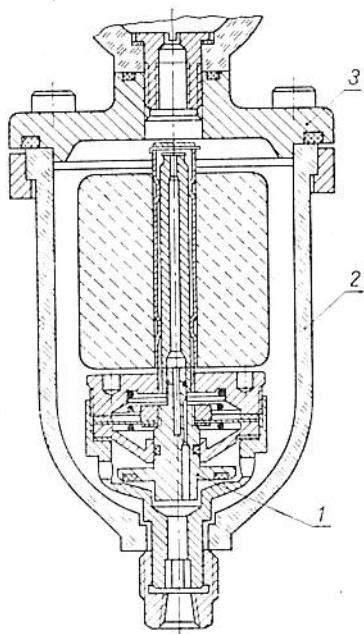


Rys. 3.52. Automat spustowy z tłokiem wspomagającym; 1 — tuleja, 2 — zawór, 3 — tłok, 4 — tuleja, 5 — tuleja iglicy, 6 — iglica, 7 — korpus, 8 — kałuż, 9 — nakładka pływaka, 10 — przepona, 11 — pierścień, 12 — siatka filtracyjna

pierścień uszczelniający. W górną część korpusu 1 jest wciśnięte gniazdo 4 z otworami i siatką 5 o wymiarze oczek 0,250 mm. Środkowy otwór nieprzelotowy 6 gniazda 4 służy do prowadzenia trzpienia 7 pływaka 8. W tulejkę 2 w dolnej części korpusu jest wkręcona śruba specjalna 9 z osiowym otworem walcowym służącym do prowadzenia trzpienia pływaka 7. Pływak 8 automatu spustowego jest wykonany w kształcie naczynia walcowego w którym jest szczelnie zamocowany trzpień pływaka 7 mający w dolnej części kryzę 10 i okienka 11. Z chwilą gdy pływak 8 zostanie uniesiony do góry, okienka 11 znajdują się powyżej górnej powierzchni śruby specjalnej 9 i łączą komorę korpusu 1 przez środkowy walcowy otwór trzpienia 7 z atmosferą. Korpus 1 automatu spustowego jest zamocowany do zespołów zestawu oczyszczania powietrza za pomocą nakrętki 12.

Działanie automatu spustowego polega na wyporze pływaka 8 przez ciecz 13 zbierającą się w dolnej części korpusu 1. Spływ wody 14 odbywa się przez przewód w dolnej części automatu.

Podobną konstrukcję automatu spustowego przedstawiono na rys. 3.51. Pływak 2, wykonany z tworzywa, jest wyposażony w górnej części w zawór 5 zamykany w pozycji, gdy ciśnienie wyporu cieczy podnosi nadmiernie pływak. Ruch pływaka ku górze powoduje otwarcie dyszy wypływowej 6. Umieszczony w obudo-

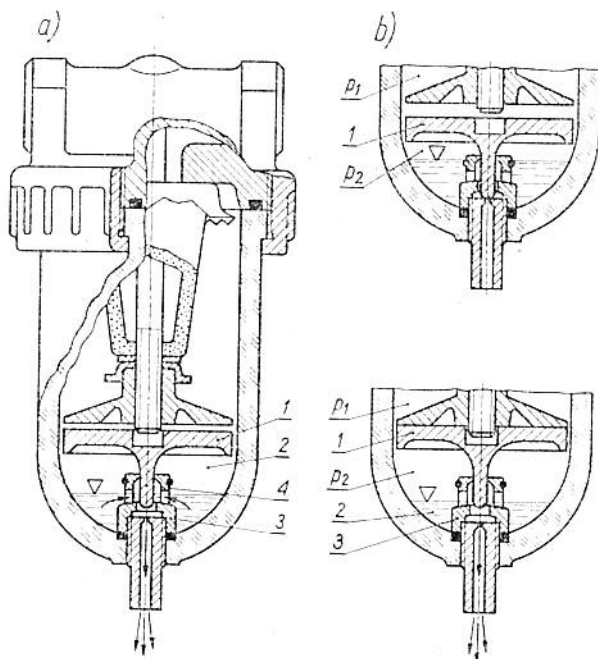


Rys. 3.53. Automat spustowy z przeponą wspomagającą; 1 — zawór, 2 — obudowa automatu spustowego, 3 — pokrywa złącza filtru

wie 1 automatu zawór ręczny 7 umożliwia spust cieczy w przypadku uszkodzenia pływaków.

Bardziej złożoną konstrukcję automatu z pływakiem i wspomagającym tłokiem przedstawiono na rys. 3.52. Ciśnienie powietrza w stanie początkowym utrzymuje tłok 3 w górnym położeniu przy zamkniętym na uszczelce zaworze 2. W chwili osiągnięcia poziomu cieczy podnoszącej pływak, następuje napełnienie gazu komory nad tłokiem 3, ruch tłoka 3 do dołu i otwarcie zaworu spustowego.

Podobnie działający automat spustowy przedstawiono na rys. 3.53. W automacie tym zastosowano odmiennej konstrukcji zawór 1 oraz przeponę wspomagającą zamiast tłoka zastosowanego w rozwiązaniu poprzednim.



Rys. 3.54. a) Filtr pneumatyczny (Watts Regulator Co) z automatem spustowym, b) kolejne fazy działania automatu; 1 — tłok, 2 — zbiornik ściekowy, 3 — zawór odprowadzający ciecz, 4 — siatka filtracyjna

Prosty w konstrukcji automat spustowy przedstawiono na rys. 3.54. Przy zamkniętym zaworze spustowym i stałym strumieniu powietrza przepływającego przez filtr, ciśnienia p_1 powyżej tłoka i p_2 poniżej tłoka 1 są sobie równe, a więc nie działa żadna

siła unosząca tłok. Tłok znajduje się w dolnym położeniu na skutek działania siły ciężkości i ciśnienia wywieranego na powierzchnię zamknięcia otworu wylotowego. Automatem otwieranie następuje w przypadku, gdy nastąpi przerwa przepływu powietrza lub przepływ przez filtr będzie mniejszy; wówczas ciśnienie p_1 rośnie aż do wyrównania z ciśnieniem w linii, tłocząc powietrze i ciecz do zbiornika ściekowego 2. Jeżeli przepływ powietrza zwiększa się ponownie, ciśnienie p_1 spada i tłok wznosi się na skutek różnicy ciśnień, otwierając otwór, przez który ciecz jest odprowadzona na zewnątrz. Wypływ ten powoduje zmniejszenie ciśnienia p_2 , a przez to powrót tłoka do położenia dolnego i zamknięcie zaworu do odprowadzania cieczy 3 oraz usunięcie dodatkowej cieczy do zbiornika ściekowego, która usunięta zostanie w następnym cyklu. Usuwanie cieczy jest zakończone bez strat powietrza.

3.5. Filtry układów hydraulicznych

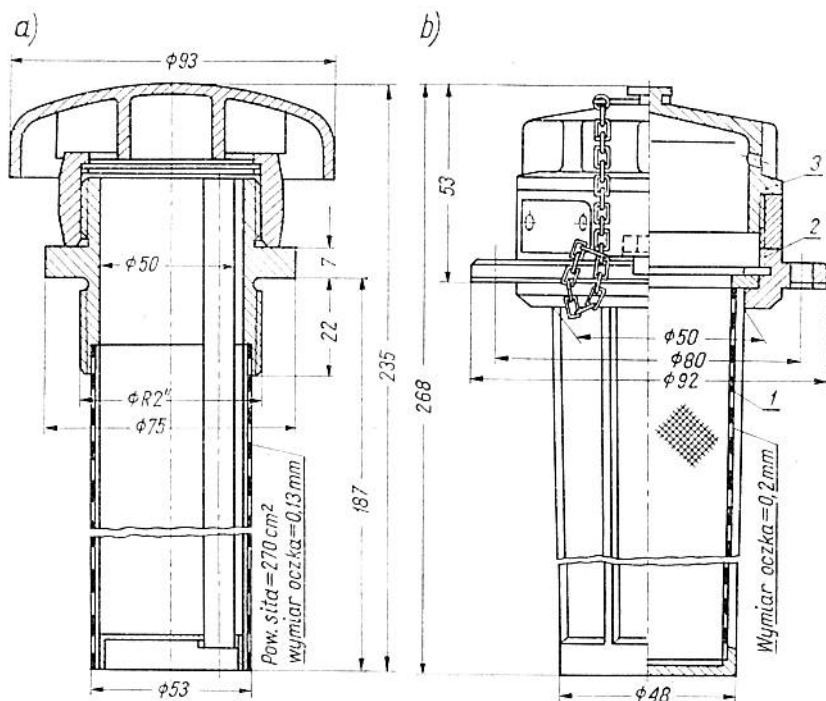
3.5.1 Filtry wlewowe

Omówimy podstawowe konstrukcje filtrów stanowiących wyposażenie hydraulicznej stacji zasilania i filtrów włączanych w linię przepływu cieczy obiegu zamkniętego. Rozpatrzmy głównie filtry porowate wyodrębniając w oddzielnym ustępie konstrukcje filtrów energetycznych, przede wszystkim magnetycznych ze względu na ich specyficzną odmienność.

Przegląd konstrukcji zaczniemy od filtrów wlewowych (zalewowych), których głównym przeznaczeniem jest oczyszczanie cieczy roboczej podczas napełniania zbiornika oraz jego uzupełniania lub wymiany. Istnieje znaczna różnorodność konstrukcji filtrów wlewowych (zwanymi też *wlewami* lub *sitami wlewowymi*), w których są wykorzystane różne materiały filtrujące. Najczęściej jednak sita wlewowe są wykonywane z metali lub tworzyw sztucznych. Stosowane są różne konstrukcje i wielkości sit zależne od dopuszczalnych prędkości przepływu cieczy podczas wlewania oraz od sposobu zamocowania w zbiorniku. Budowane są filtry zamocowywane przy użyciu kołnierza i śrub lub gwintu do pokrywy zbiornika albo górnej części ściany bocznej (pionowo i pod kątem ok. 30°). Przykład budowy filtra wlewowego z zamocowaniem śrubami pokazano na rys. 3.46, przy omawianiu zbiornikowych filtrów powietrza. Na rysunku tym zwraca uwagę usztyw-

nienie sita wlewowego perforowanym koszem z blachy. Sita wlewowe są również budowane w taki sposób, że wkład filtracyjny można wyjmować po dokręceniu nakrętki zamykającej (z filtrem powietrza lub otworem odpowietrzającym albo hermetycznym), najczęściej w celu jego oczyszczenia. Niektóre konstrukcje filtrów wlewowych są wyposażone w rurkę odpowietrzającą w celu ułatwienia wlewania cieczy do zbiornika. Dokładność filtrowania użytych w zbiornikach filtrów wlewowych na ogół zawiera się w granicach od $0,04 \div 0,06$ mm do $0,10 \div 0,15$ mm.

Na rys. 3.55 pokazano dwie konstrukcje filtrów wlewowych oraz podano podstawowe wymiary przykładowych wielkości z typoszeregów. Filtry typoszeregu WW1-S mają jednakową budowę.

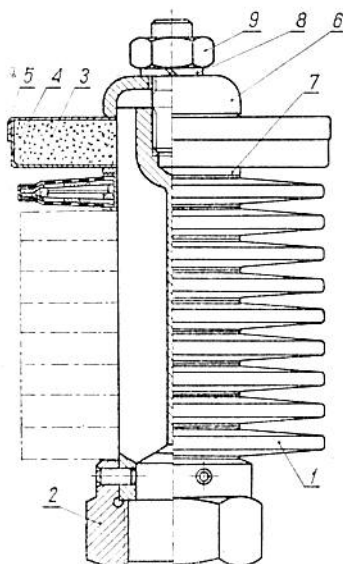


Rys. 3.55. Konstrukcja i wymiary podstawowe w mm filtrów wlewowych:
a) Eppensteiner (nr 4) b) OKH-WSK Wrocław (WW1-50S)

Zasadniczym elementem konstrukcyjnym jest siatkowy zespół filtracyjny 1 osadzony w gnieździe zamocowującym 2. W nakrętce 3 znajdują się otwory odpowietrzające. Nakrętka może być zastąpiona filtrem powietrza wkręconym w gniazdo 2.

3.5.2. Filtry ssawne

Filtry ssawne są instalowane w zbiorniku i pracują przy pełnym zanurzeniu w cieczy roboczej. Przeznaczone są do oczyszczania cieczy zasysanej przez pompę ze zbiornika i dlatego też w większości rozwiązań konstrukcyjnych nie mają obudowy. Przykład konstrukcji filtra ssawnego złożonego z segmentów talerzowych siatkowych pokazano na rys. 3.56. Jest to filtr z typoszere-

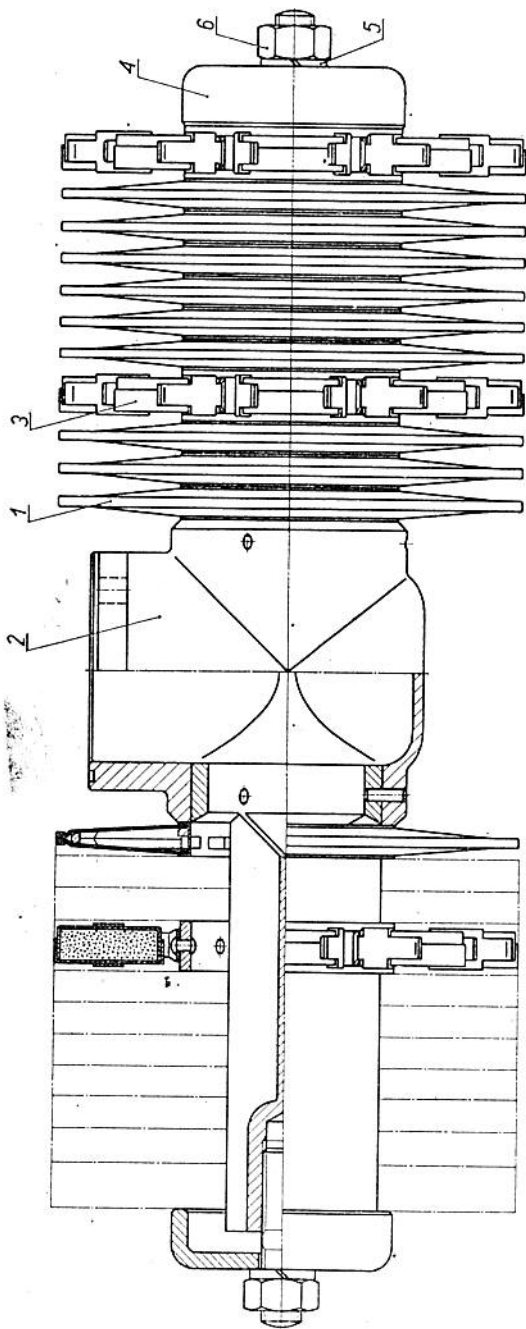


Rys. 3.56. Filtr ssawny zbudowany z siatkowych segmentów talerzowych typoszeregu WS1-SM

gu WS1-SM opracowanego przez OKH-WSK Wrocław. Filtr jest złożony ze stosu segmentów talerzowych 1 i jest wyposażony w dodatkowy wkład magnetyczny 3 osłonięty cienkimi pokrywkami kubkowymi z materiału niemagnetycznego 4 i 5. Segmenty siatkowe rozdzielone pierścieniami uszczelniającymi 7 są osadzone na trzonie z przyłączem gwintowanym 2 i zamocowane nakrętką 9 przez sprężystą podkładkę 8 i kołpak 6.

Na rys. 3.57 przedstawiono filtr stosowany przy większych natężeniach przepływu. Różnica między tym filtrem a poprzednim polega na zastosowaniu w nim wkładu magnetycznego o nieco odmiennej budowie (satelitarny układ magnesów).

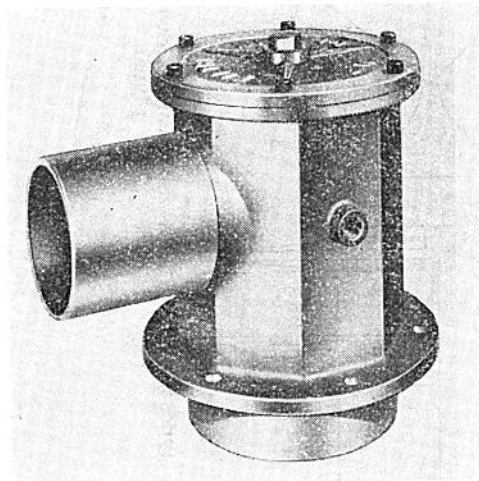
Talerzowe segmenty siatkowe 1 wraz z wkładem magnetycznym 3 są nałożone na centralny trzon 2, stanowiący kolektor



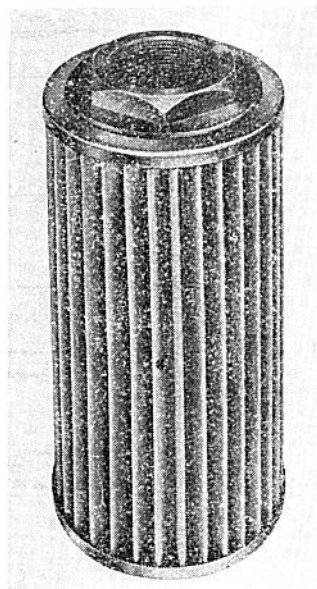
Rys. 3.57. Filtr ssawny typoszeru WS1-SM zbudowany z dwu wkładów, przeznaczony do dużych natężeń prze-
pływu

oczyszczonej cieczy, która wypływa wspólnym otworem połączonym z przewodem ssącym pompy. Zamocowanie segmentów tałerszowych i magnesów dokonuje się nakrętką 6 przez podkładkę sprężystą 5 i kołpak 4. Filtry ssawne dla jeszcze większych natężeń przepływu mają zamocowane stopy filtrujące w układzie trójramiennym lub czteroramiennym kolektora.

Odmianą filtrów ssawnych są *filtry wyposażone w zawór przelewowy (bocznikowy)* stanowiący oddzielnie montowany zespół. Stosowane są one w układach hydraulicznych, w których może wystąpić szkodliwe oddziaływanie zjawiska kawitacji pompy. Przy wystąpieniu nadmiernego oporu na filtrze np. podczas rozruchu układu hydraulicznego, lub przy wystąpieniu nadmiernego zanieczyszczenia filtra, następuje otwarcie zaworu bocznikującego ssanie cieczy. Filtr ssawny F2 (rys. 3.58) firmy MP Filtri Per Oleodi-



Rys. 3.58. Filtr ssawny w obudowie wyposażony w sygnalizator zanieczyszczenia wkładu (typ F2, firmy MP, Włochy)



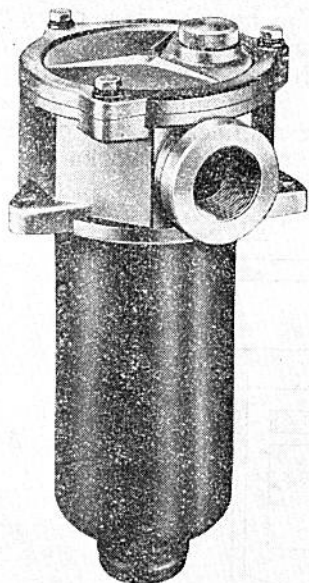
Rys. 3.59. Filtr ssawny siatkowy w kształcie gwiazdy bez obudowy (typy TSC i TFL firmy MP, Włochy)

namica (Włochy) cechuje oryginalna konstrukcja. Jest on wyposażony we wkładki magnetyczne zatrzymujące zanieczyszczenia ferromagnetyczne oraz sygnalizator stanu zanieczyszczenia wkładu z wyjściowym sygnałem elektrycznym wyłączającym automatycz-

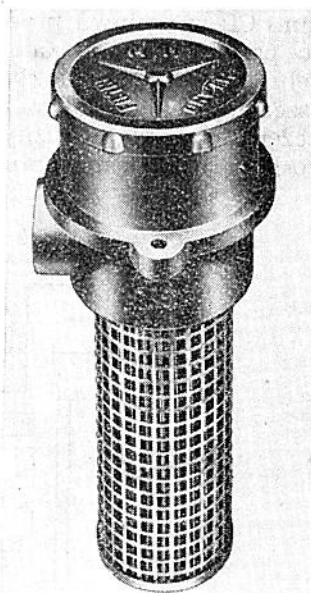
nie napęd hydrauliczny, gdy wkład filtracyjny jest nadmiernie zanieczyszczony. Standardowe wkłady są wyposażone w sita filtracyjne w zakresie filtrowania $250 \div 90 \mu\text{m}$ oraz $40 \mu\text{m}$. Wkłady filtracyjne bez obudowy umieszczone na ssaniu (rys. 3.59), typu TSC i TFL, są używane zarówno do filtrowania olejów, jak i benzyny. Wkłady ssawne typu TSC są budowane z sit filtracyjnych w zakresie filtrowania $90 \div 60 \mu\text{m}$ oraz $25 \mu\text{m}$ (siatka ze stali nierdzewnej) i wyposażone w elementy magnetyczne. Wkłady typu TFL umożliwiają uzyskanie standardów dokładności filtrowania 250 i $90 \mu\text{m}$ i nie są wyposażone w elementy magnetyczne.

3.5.3 Filtry sphywowe

Filtry sphywowe są instalowane w linii powrotu cieczy z układu hydraulicznego. Stosowane są trzy rodzaje podłączenia takich filtrów: dwuprzewodowe z wlotem i wylotem z kadłuba filtru, jednoprzewodowe z wlotem do kadłuba filtru i wylotem cieczy z obudowy wkładu (obudowa zanurzona częściowo w cieczy zbiornika lub zawierająca nasuwany odcinek przewodu) oraz jednoprzewo-



Rys. 3.60. Widok filtra sphywowego z centralnym przewodem wylotu cieczy (seria RTS-MPF firmy MP, Włochy)

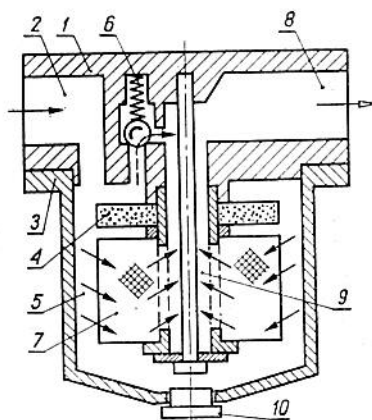


Rys. 3.61. Filtr sphywowy bez obudowy wkładu filtracyjnego (seria SRTS firmy MP, Włochy)

dowe filtry bez osłony wkładu. Ostatnia odmiana filtra sphywowego jest połączona z pokrywą górną lub ścianą boczną zbiornika w ten sposób, że wkład filtracyjny znajduje się w wewnętrznej przestrzeni zbiornika.

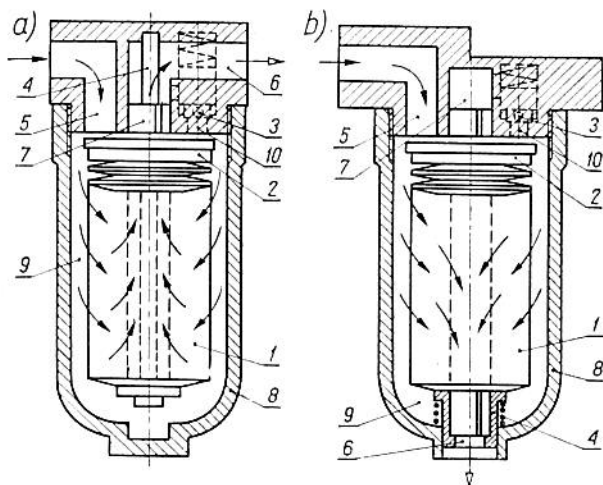
Na rys. 3.60 przedstawiono filtr RTS-MPF w obudowie przeznaczony do instalowania w linii sphywowej, wytworzony przez firmę MP Filtr i Per Oleodinamica (Włochy). Filtry te nadają się do natężeń przepływu od 8 do 450 l/min, mają sity filtracyjne o dokładności filtrowania 90, 40 i 25 μm . Filtr sphywowy serii SRTS, przedstawiony na rys. 3.61, ma zamiast obudowy z centralnym przewodem osłonę z blachy perforowanej umożliwiającą wypływ cieczy na zewnątrz całą powierzchnią zewnętrzną wkładu filtracyjnego. Stosowanie takich filtrów jest zalecane jedynie w przypadku ich montażu na płycie górnej lub na ścianie bocznej zbiornika cieczy.

Przykładem dwuprzewodowego filtra siatkowego przeznaczonego do instalowania na sphywie (linia powrotu cieczy do zbiornika) jest filtr serii FSN-S opracowany przez OKH-WSK Wrocław, przedstawiony na rys. 3.62. W kadłubie 1 filtra jest umieszczony wkład filtrujący 7 wykonany z nawiniętej na metalowy szkielet siatki filtrującej o maksymalnym wymiarze oczek mniejszym od 0,1 mm. Ciecz wpływa przez wlot 2 do komory 5, a po przepłynięciu przez wkład 7, kanałem 9 przedostaje się do wylotu 8. W celu zwiększenia dokładności filtrowania nad wkładem 7 umieszczono wkład magnetyczny 4 zatrzymujący część zanieczyszczeń ferromagnetycznych. Część zanieczyszczeń osiadłą na dnie osłony 3 filtra można usuwać po odkręceniu korka 10. W ce-



Rys. 3.62. Schemat budowy filtrów siatkowych niskociśnieniowych średnio-dokładnych typoszeregu FSN-S

lu zabezpieczenia wkładu siatkowego przed uszkodzeniem (pogięciem, zgnieceniem) w przypadku znacznego zanieczyszczenia filtru, a więc — przed wzrostem różnicy ciśnień przed i za wkładem



Rys. 3.63. Schematy konstrukcyjne filtrów spływowych z talerzowymi segmentami wkładu filtracyjnego

filtru, zastosowano zawór przelewowy otwierający się przy określonym spadku ciśnienia na filtrze (określonym napięciem wstępnym sprężyny 6). Opisany filtr jest wykonywany w kraju przez ZSM Sędziszów Młp. Ma małe opory przepływu i wyróżnia się dużą trwałością. Wkład filtrujący może być zastąpiony przez wkład z materiałów spiekanych, co zwiększa jego wytrzymałość i dokładność filtrowania.

Przykłady odmian konstrukcyjnych filtrów typoszeregu FSN przedstawiono na rys. 3.63. Na rys. 3.63a kadłub filtru jest wykonany ze stopu aluminium. Znajduje się w nim gniazdo wlotowe 5 i wylotowe 6 oraz kanał centralny 7 mieszczący trzon wkładu talerzowego 1. W kadłubie znajdują się dwa zawory przelewowe 3 zabezpieczające przed zniszczeniem wkłady filtrujące 1. Wkład filtrujący składa się ze stopu segmentów talerzowych siatkowych osadzonych na trójramiennym trzonie, skręconych śrubą 4. Wkład magnetyczny 2 znajduje się w rozbieralnej osłonie aluminiowej. Osłona 8 filtru stanowiąca obudowę służy do zbierania zanieczyszczeń w dolnej części 9 osadnika, opadających z wkładu filtrującego. Działanie filtru jest następujące. Olej doprowadzony przewodem do gniazda wlotowego 5 omywa wkład magnetyczny 2 zatrzymujący zanieczyszczenia ferromagnetyczne. Następnie prze-

plywa przez wkład filtracyjny 1, gdzie zostaje oczyszczony z zanieczyszczeń stałych i płynie do kanału centralnego 7 oraz dalej do otworu wylotowego 6 połączonego z przewodem odprowadzającym oczyszczony olej. Przy nadmiernym wzroście ciśnienia na wkładzie filtrującym następuje otwarcie zaworu 3 i przepływ oleju kanałem 10 do kanału centralnego 7 i wylotu filtru. Opadające zanieczyszczenia gromadzą się w dolnej części 9 osadnika.

W filtrze przedstawionym na rys. 3.63b kadłub filtru ma budowę dostosowaną do zabudowy zbiornikowej filtru, tj. ma kołnierz z otworami do zamocowania filtru w zbiorniku. W kadłubie znajduje się jedynie gniazdo wlotu 5. Otwór wylotowy 6 znajduje się w dolnej części 9 osadnika 8. W kadłubie znajdują się dwa zawory przelewowe 3. Talerzowe segmenty siatkowe tworzące wkład filtrujący 1' są osadzone na trójramiennym trzonie i dociśnięte za pomocą tulei i sprężyny 4. W górnej części wkładu filtrującego znajduje się wkład magnetyczny 2. Osadnik w dolnej części ma otwór prowadzący tuleję 4, w której znajduje się otwór odprowadzający olej na zewnątrz wylotu 6. Działanie tego filtru jest analogiczne jak filtru poprzedniego z następującą różnicą: po przejściu przez wkład filtrujący 1' olej płynie kanałem centralnym 7 do otworu odprowadzającego przez otwór tulei 4 znajdującego się w dolnej części osadnika.

3.5.4 Filtry włączane w linię ciśnieniową

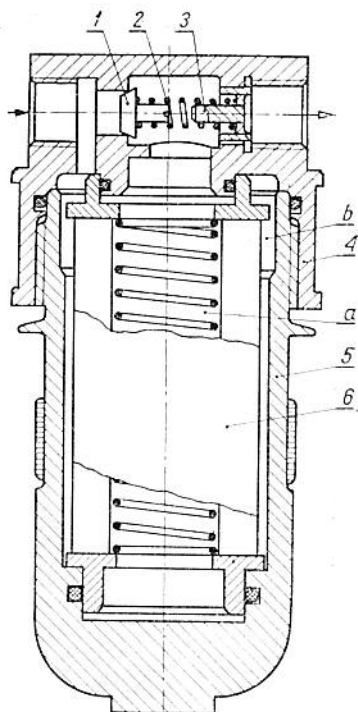
Filtry hydrauliczne instalowane w linii ciśnieniowej w zależności od zakresu ciśnień roboczych dzieli się na *filtry niskociśnieniowe*, *średnociśnieniowe* i *wysokociśnieniowe*. Filtry niskociśnieniowe i średnociśnieniowe mogą być wykorzystywane jako filtry spływowe w układach hydraulicznych wysokociśnieniowych. Wkłady wszystkich tych filtrów mogą być wykonywane z dowolnych materiałów filtracyjnych.

Na rys. 3.64 pokazano typową konstrukcję filtru z wkładem papierowym. W obudowie składającej się z głowicy 4 i osłony 5, znajduje się papierowy (AFB-1) wkład filtrujący 6, przeznaczony do dokładnego oczyszczania cieczy roboczej. Element ten typu gwiazdy z rusztem wzmacniającym sprężynowym jest utworzony przez wzdłużnie pofalowany papier wraz z siatką, do którego z obu stron są przyklepione dwa kołnierze wykonane z tworzywa sztucznego. W górnej części głowicy 4 znajdują się dwa otwory (wlotowy i wylotowy). Wewnątrz głowicy, w podtoczeniu, znajduje się zawór przelewowy, którego grzybek jest przyciskany do otworu wlotowego sprężyną 2. Ruch grzybka zaworu jest ograniczony oporem 3. Ciecz robocza dostaje się do filtru przez otwór wlotowy

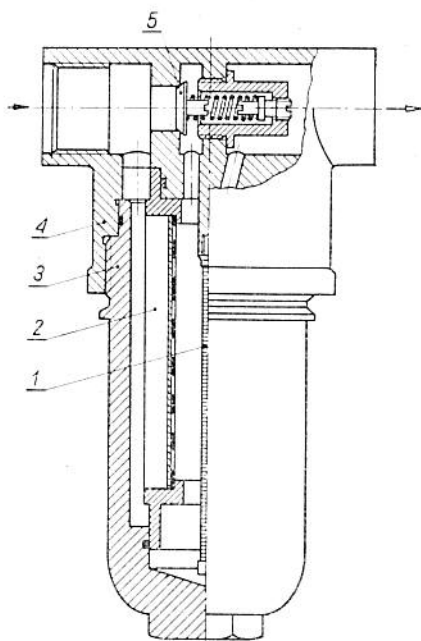
wy i stąd bezpośrednio do komory *b*, zaś następnie przepływa przez wkład papierowy, na którym następuje filtrowanie, przechodzi do komory *a* i opuszcza filtr przez otwór wylotowy.

W przypadku zatkania wkładu filtrującego i osiągnięcia granicznego spadku ciśnienia na filtrze otwiera się zawór przelewowy *1* i ciecz robocza z otworu wlotowego dostając się bezpośrednio do otworu wylotowego nie jest całkowicie filtrowana.

Na rys. 3.65 przedstawiono typowy filtr papierowy montowany w układach hydraulicznych samolotów transportowych. Filtr ten składa się z głowicy *4* i osłony *3* wewnątrz której znajdują



Rys. 3.64. Wysokociśnieniowy filtr dokładnego oczyszczania FG-42 stosowany w hydraulicznych układach samolotu An-24

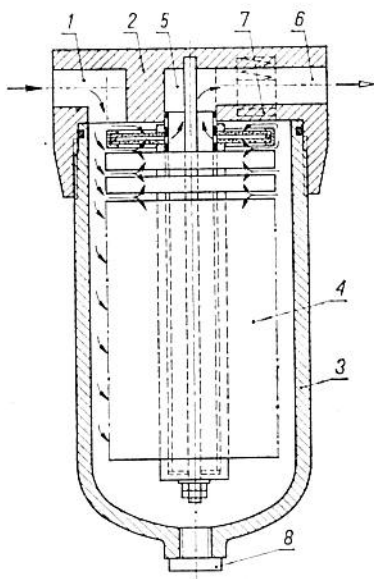


Rys. 3.65. Filtr wysokociśnieniowy z wkładami papierowymi i z sita filtracyjnego

się wkłady filtrujące dokładnego *2* i zgrubnego oczyszczania *1*. W górnej części głowicy znajduje się zawór przelewowy *5*. Wkład filtrujący zgrubnego oczyszczania jest zwykle siatkowy, zaś wkład dokładnego oczyszczania — papierowy. Przy zanieczyszczeniu pa-

pierowego wkładu dokładnego oczyszczania aż do osiągnięcia granicznego spadku ciśnienia zawór przelewowy zostaje otwarty i płyn roboczy przedostaje się przez wkład zgrubnie filtrujący do otworu wylotowego.

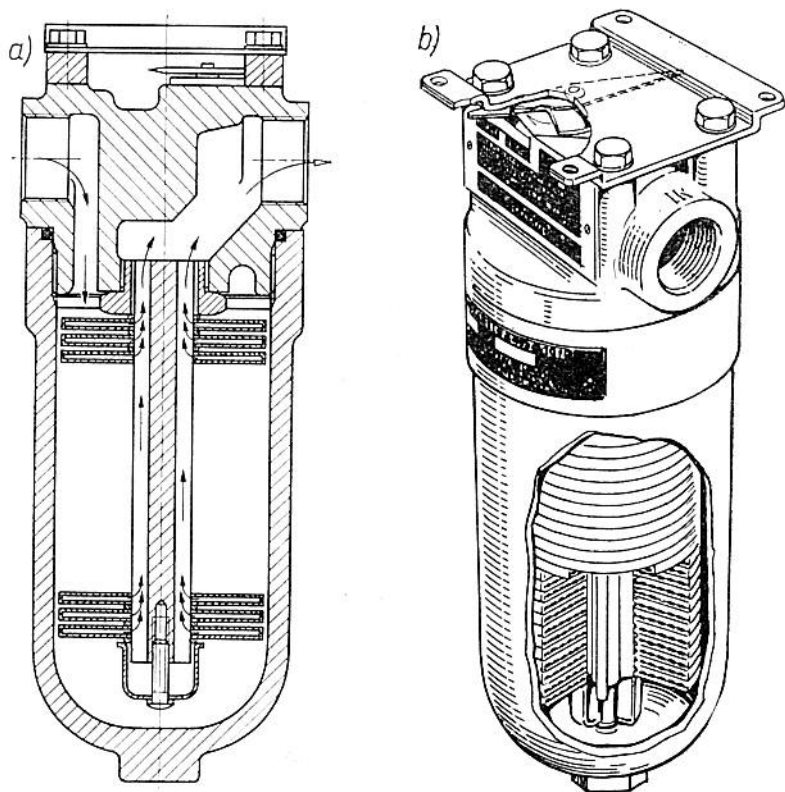
Wysokociśnieniowe filtry granulkowe oraz siatkowe dokładnego oczyszczania są przeznaczone do stosowania w układach hydraulicznych. Instalowane są przede wszystkim w linii tłocznej. Najczęstszym sposobem zabudowy takich filtrów jest podłączenie przewodowe w układzie. Typową konstrukcję przedstawiono na rys. 3.66. Ciecz niefiltrowana dopływa do filtru kanałem wlotowym 1, umieszczonym w kadłubie 2 do wnętrza osłony 3. Ciecz przepływa przez wkład filtrujący 4, w którym następuje jej oczyszczenie z zanieczyszczeń i z wnętrza segmentów wkładu centralnym kanałem 5 wydostaje się przewodem wylotowym 6. Filtr może być wyposażony w zawór przelewowy 7 (ograniczający spadek ciśnienia) i sygnalizator zanieczyszczeń, ewentualnie w korek



Rys. 3.66. Schemat filtru wysokociśnieniowego z talerzowymi wkładami ze spieków

gwintowy 8 do okresowego spuszczenia zanieczyszczeń. Stosowanie zaworu przelewowego jest niewskazane w przypadku instalowania filtrów w układach, do których ze względu na właściwe ich funkcjonowanie jest niedopuszczalne przedostanie się zanieczyszczeń o wymiarach większych niż dokładność filtrów.

Schemat konstrukcyjny filtra wysokociśnieniowego (Fairey) z zastosowaniem talerzowych wkładów filtracyjnych ze spieków metalowych lub tworzywa sztucznego pokazano na rys. 3.67. Filtr



Rys. 3.67. Filtr wysokociśnieniowy z zastosowaniem talerzowych wkładów filtracyjnych (Fairey): a) przekrój, b) widok

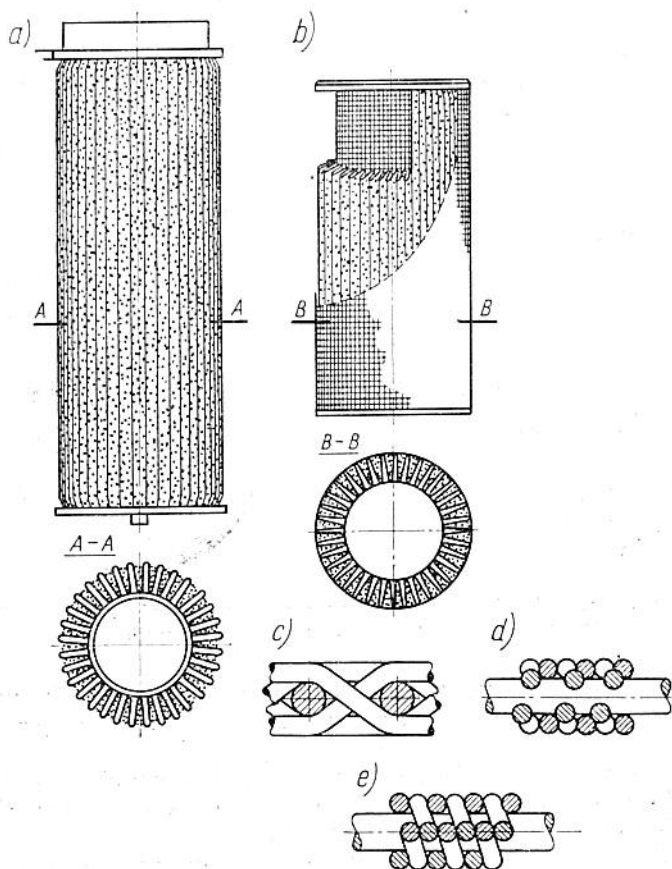
ten, wyposażony w sygnalizator stanu zanieczyszczenia wkładu z wyjściowym sygnałem elektrycznym, nie ma zaworu przelewowego.

Obecnie w budowie filtrów wysokociśnieniowych istnieje tendencja do stosowania jednoczęściowych wkładów filtracyjnych o kształcie cylindrycznym typu „gwiazda”.

Przedstawione na rys. 3.68 wkłady filtrów mają, oprócz właściwej powierzchni filtrującej dwie lub jedną osłonę wykonaną z tworzywa sztucznego albo metalu o dużej odporności na rozciąganie i korozję przy zetknięciu z cieczą lub gazem filtrowanym. Osłony te służą do wzmocnienia konstrukcji wkładu filtrującego

i jednocześnie wychwytyją zanieczyszczenia o większych wymiarach. Nitki tkaniny stanowiącej osłonę są związane np. przez zgrzewanie w punktach krzyżowania się ich, tak aby przedstawiały stosunkowo czworokątne pory i wiernie zachowywały właściwy początkowy wymiar.

Właściwa warstwa filtrująca podobnie jak osłony jest wykonana z metalu lub tworzywa nie korodującego i odpornego na działanie sił rozciągających. W celu zmniejszenia zbyt dużej różnicy ciśnień występującej podczas filtrowania między jedną a drugą stroną tej warstwy jest ona pofalowana, co pokazują przekroje



Rys. 3.68. Typowa konstrukcja wkładów filtracyjnych cylindrycznych typu gwiazdowego: a) bez osłony zewnętrznej, b) z osłoną siatkową zewnętrzną stanowiącą pierwszy stopień filtrowania, c, d, e) sploty sił filtracyjnych wkładów

poprzeczne filtrów. Taki sposób ułożenia tej warstwy zwiększa powierzchnię filtrującą, a zatem zmniejsza opory przepływu cieczy lub gazu. Sposób tkania nitek warstwy filtrującej pokazano na rys. 3.68 c, d, e. Nitki te są przeplatane jedna w drugą w sposób zapewniający zachowanie wymiarów porów. Tak tkane nitki powinny tworzyć pory o wymiarach do 10 μm i zachować je przez długi okres użytkowania. Zwiększenie sztywności warstwy filtrującej uzyskuje się przez jej wzmocnienie grubszymi nitkami lub prętami co pokazano na rys. 3.68 d, e.

Wkład filtracyjny może być wykonany w postaci okrągłej płytki z otworem na przepływ cieczy lub gazu i pierścieniem lub kołnierzem służącym do umocowania filtru. Cylindryczne wkłady filtrujące są bardzo lekkie i zapewniają dobre efekty pracy. Mogą być wykonane w każdym rozmiarze w zakresie średnicy zewnętrznej od 10 mm do 100 mm i długości od 25 mm do 250 mm. Ponieważ filtry te mogą pracować w układach wysokościowych, zatem w celu wzmocnienia ich warstwy filtrującej do wewnętrznej komory wkłada się sprężynę.

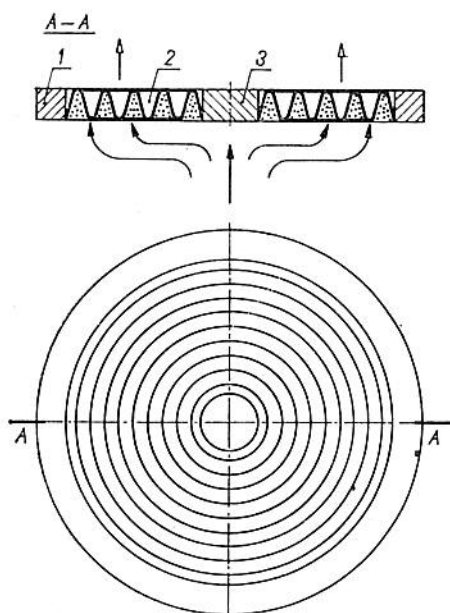
Inny kształt wkładów filtracyjnych pokazano na rys. 3.69. Są to *filtry płaskie (talerzowe)*, które mają warstwę filtrującą 2 tkaną identycznie jak filtry cylindryczne (rurowe) z nitek metalowych lub z tworzywa nie korodującego. Warstwa 2 jest również pofalowana, przy czym fałdy tej warstwy tworzą jak gdyby zespół równoległych pierścieni (kół). Obrzeże warstwy filtrującej stanowi pierścień metalowy 1, który usztywnia i wzmacnia ją. Pierścień ten jednocześnie służy do zamocowania wkładu. Dodatkowa metalowa okrągła płytka 3 umieszczona w środku pofalowanej warstwy filtrującej stanowi element usztywniający, a w przypadku używania filtru w układzie wysokociśnieniowym jest miejscem podparcia, w celu zabezpieczenia warstwy przed wygięciem i ewentualnym uszkodzeniem.

Filtry tego typu charakteryzują się dużą niezawodnością i zapewniają uzyskanie bardzo dobrych efektów pracy. Większość z tych filtrów powinna być czyszczona dopiero po około 2000 godzin użytkowania. Mogą zatem być one z dużym powodzeniem używane do płynowych układów oraz we wszystkich układach, w których jest wymagana czystość cieczy czy gazu.

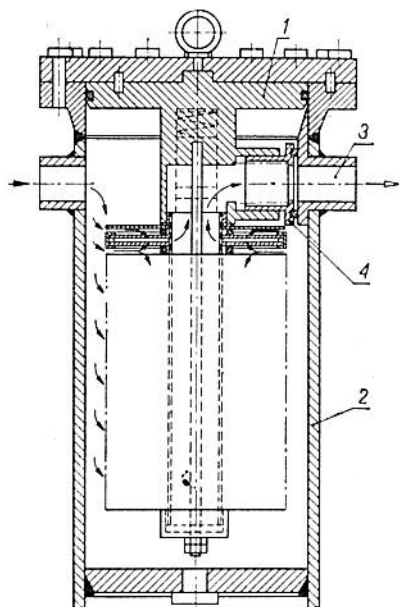
Na rys. 3.70 przedstawiono schemat konstrukcyjny filtru wysokociśnieniowego na duże natężenie przepływu. Kadłub 1 jest wykonany z odkuwki lub odlewu ze stopów aluminium, natomiast osadnik 2 — z rury stalowej z przyspawanym dnem. Łączenie kadłuba i osadnika może być realizowane na zasadzie połączenia właczanego lub gwintowego albo też z zastosowaniem płyty zamocowanej do osadnika za pomocą śrub. W tym ostatnim roz-

wiązaniu kadłub umieszczony wewnątrz osadnika jest wyposażony w uszczelnienia między płytą nakrywającą 4 a wylotową końcówką 3 przyspawaną do osadnika 2.

Identyczną budowę jak przedstawiona na rys. 3.66 i rys. 3.70 mają filtry siatkowe wysokociśnieniowe średniociśnieniowe typów FS1-160-SM i FS1-320-SM opracowane przez kombinat Delta-Hydral. Zastosowano tam talerzowe wkłady z sita metalowego oraz dodatkowo wkład magnetyczny. Filtry te są wyposażo-



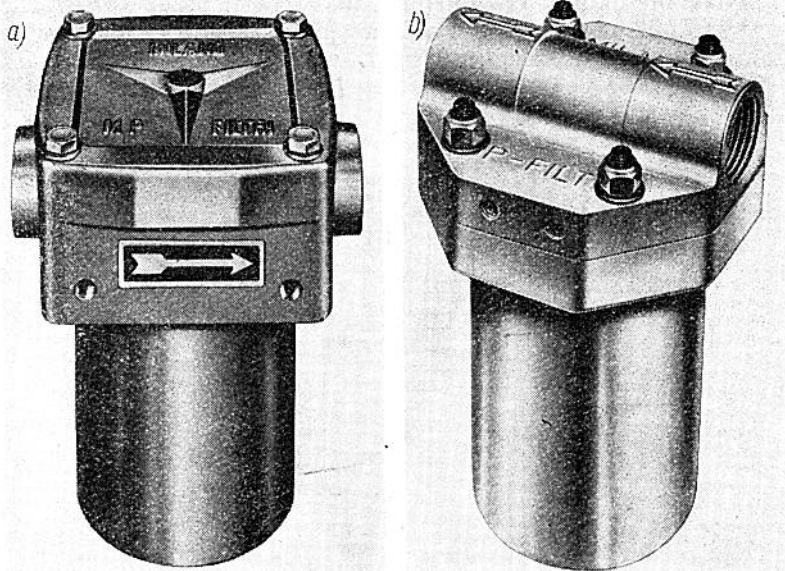
Rys. 3.69. Talerzowy wkład filtracyjny wykonany z sit dla filtrów wysokociśnieniowych



Rys. 3.70. Schemat filtra wysokociśnieniowego na duże natężenie przepływu cieczy

ne w zawór przelewowy. Mogą być stosowane w zakresie natężeń przepływu $10 \div 250$ l/min dla ciśnień 150 kg/cm^2 i $10 \div 100$ l/min dla ciśnień do 320 kg/cm^2 .

Widok zewnętrzny filtra średniociśnieniowego włączanego w linię hydrauliczną LBP4/5/6 firmy MP Filtri Per Oleodinamica (Włochy) przedstawiono na rys. 3.71. Dokładność filtrowania wynosi $90 \div 40 \mu\text{m}$ i $25 \mu\text{m}$. Wkłady filtracyjne wykonane z sit metalowych, a przy dokładności filtrowania $25 \mu\text{m}$ — z sit ze stali nierdzewnej, mogą być zastąpione wkładami papierowymi jednorazowego użytku. Mogą one być użyte jako filtry ssawne w zakre-



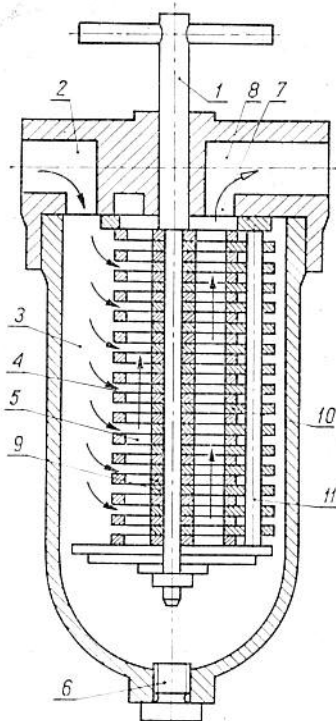
Rys. 3.71. Filtry średniociśnieniowe firmy MP (Włochy) serii: a) LBP3, b) LBP4/5/6

sie natężeń przepływu $50 \div 160$ l/min oraz jako filtry splywowe w zakresie $100 \div 330$ l/min.

Również z serii LBP (LBP3) są produkowane filtry średniociśnieniowe (40 barów) obejmujące natężenia przepływu 60 l/min (do włączenia w linię ciśnieniową). Użyte jako filtry ssawne mogą być stosowane do natężeń przepływu $13 \div 30$ l/min i jako filtry splywowe do natężeń przepływu $26 \div 60$ l/min. Normalne wyposażenie filtrów serii LBP3 stanowią magnesy stałe umocowane w przestrzeni polifiltracyjnej i zawór przelewowy otwierający się przy spadku ciśnienia wynoszącym 1,5 bara. Dopuszczalna temperatura pracy wynosi 80°C .

Znaczną grupę filtrów włączanych w linię ciśnieniową stanowią filtry szczelinowe. Istnieją różnorodne konstrukcje takich filtrów. Na rys. 3.72 przedstawiono filtr szczelinowy produkowany przez ZSM Sędziszów. Jest to typowy przykład *filtru powierzchniowego*. W kadłubie 7 filtru na obrotowym trzpieniu 1 zamocowano 1200 cienkich blaszek 5. Pomiędzy nimi znajdują się nieruchome blaszki 10, przymocowane do trzpienia 11. Blaszki te mają grubość 0,08 mm. Pomiędzy blaszkami ruchomymi 5 a stałymi 9 znajdują się szczeliny 4. Ciecz robocza wpływa do komory 3 króćcem wlotowym 2 i po przepłynięciu przez szczeliny utworzo-

ne między blaszkami 5 wydostaje się z filtru przez wylot 8. Zanieczyszczenia zatrzymane na krawędzi szczelin (mogą się one częściowo wbijać w szczeliny) są usuwane okresowo przez ręczny



Rys. 3.72. Filtr szczelinowy zbudowany ze stosu płytek (FPW-11, ZSM Sędziszów Młp)

obrót trzpienia 1 i związanych z nim blaszek 5. Z dna filtru można zanieczyszczenia usuwać po odkręceniu korka 6. Filtry te są wytrzymałe na impulsowe zmiany ciśnienia. Mają one bardzo dobre charakterystyki przepływu. Ze względu na skomplikowaną konstrukcję i stosunkowo niską dokładność są one stopniowo wycyfrowane z produkcji.

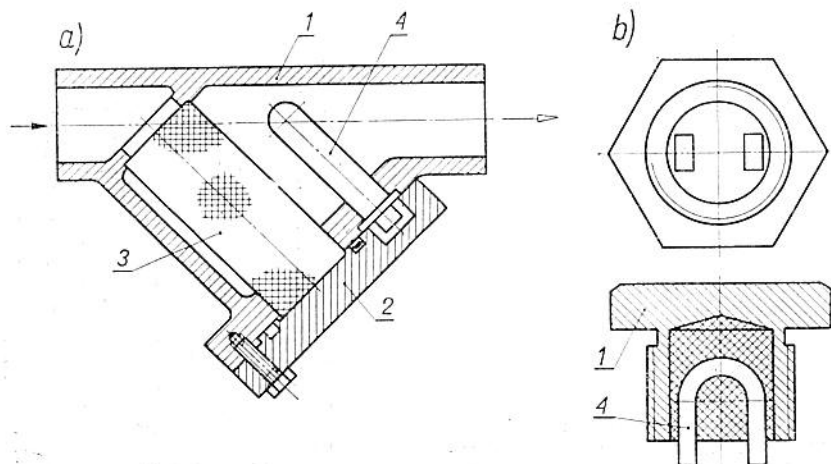
W instalacjach hydraulicznych krajowych są stosowane następujące rodzaje filtrów szczelinowych: filtry do natężeń przepływu 10, 20 i 100 l/min oraz ciśnień roboczych 16, 25, 160 kG/cm²; filtry płytkowe i zespoły filtrujące płytkowe FPW-11, FP-13, FZ-11, FZ-13 oraz filtry i zespoły filtrujące z drutu profilowanego F-201, FH-04, FH-04/S, a ponadto filtr oleju G151.00.00.

Opracowany przez kombinat Delta-Hydral typoszereg filtrów płytkowych niskociśnieniowych średniokładnych FP1-16-S zawiera 8 wielkości oraz typoszereg filtrów płytkowych wysokociśnieniowych FP1-160-S i FP1-320-S zawiera 12 wielkości po 6 dla ciśnień 160 i 320 kG/cm².

3.6. Filtry magnetyczne

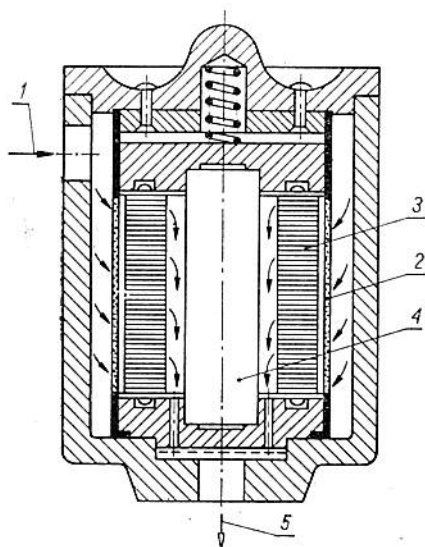
Filtry magnetyczne są zazwyczaj stosowane w konstrukcjach filtrów kombinowanych. Istnieje duża różnorodność budowy i zastosowań filtrów wykorzystujących całkowicie lub tylko częściowo efekt filtrowania magnetycznego. W przewodach i złączach instalacji hydraulicznej są stosowane korki lub chwytaki magnetyczne. Wkłady takie najczęściej stosuje się w połączeniu z filtrem porowatym lub przegradą siatkową (strainer) o dużych wymiarach oczek, w celu równomiernego rozprowadzenia cieczy i wyeliminowania gwałtownych zmian prędkości w obszarze oddziaływania pola magnetycznego. Takie rozwiązanie utrudnia odrywanie się cząstek zanieczyszczeń, osiadłych na magnesie (rys. 3.73).

Zasadniczo są stosowane cztery typy konstrukcyjne filtrów magnetycznych z wykorzystaniem przegród porowatych, instalowanych w linii hydraulicznej, w których całkowita ilość cieczy przepływającej przez filtr przechodzi przez wkład porowaty.



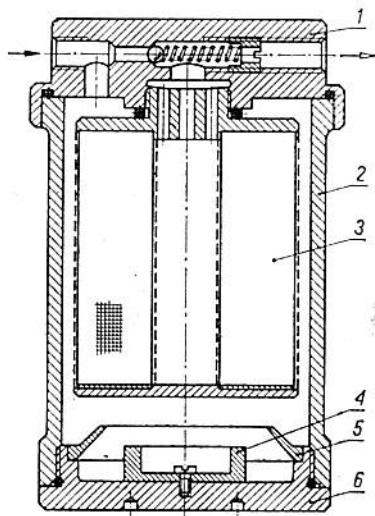
Rys. 3.73. Chwytnik magnetyczny: a) zainstalowany w bezpośredniej bliskości siata zgrubnego; b) jako korek magnetyczny; 1 — obudowa, 2 — pokrywa, 3 — sito zgrubne (strainer), 4 — magnes stały

W filtrze przedstawionym na rys. 3.74 ciecz wpływa otworem wlotowym 1 do przestrzeni zamkniętej wkładem porowatym 2, przepływa przez ten wkład, a następnie przez stos płytkowych



Rys. 3.74. Filtr magnetyczny w postaci stosu płytek umieszczonych za przegradą porowatą

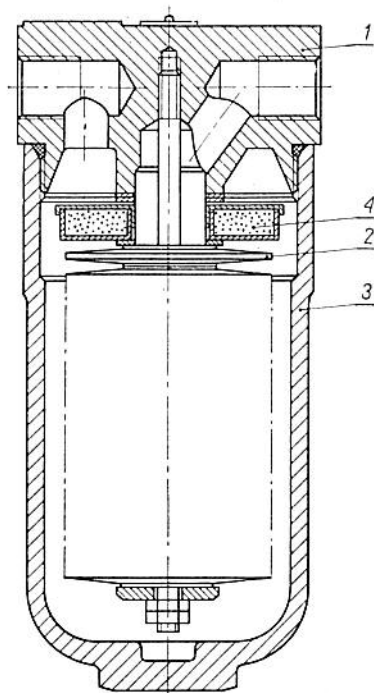
magnesów 3, rozmieszczonych tak, aby były między nimi „szczeliny” magnetyczne. Ciecz przepływa dalej przez cylindryczną komorę utworzoną wokół walca 4 z materiału magnetycznego i dalej do otworu wylotowego 5.



Rys. 3.75. Filtr porowaty z wkładem magnetycznym umieszczonym w korpusie filtru; 1 — obudowa, 2 — osłona boczna, 3 — wkład filtracyjny porowaty, 4 — magnes stały, 5 — deflektor, 6 — pokrywa dolna

W filtrze przedstawionym na rys. 3.75 manges stały 4 jest umieszczony w przestrzeni komory osadczej przed porowatym wkładem filtracyjnym 3. Magnes stały o specjalnym kształcie znajduje się w strefie najmniejszej cyrkulacji cieczy zrealizowanej przy użyciu deflektora 5. Takie umieszczenie magnesu powoduje minimalny wpływ na przepływającą ciecz, ale silnie oddziałuje na osadzające się w strefie spokoju zanieczyszczenia większych wymiarów.

Odmienne działanie powoduje pole magnetyczne wytworzone przez magnes 4 w filtrze siatkowym, przedstawionym na rys. 3.76. Obecność pola magnetycznego w przestrzeni wlotu cieczy praw-



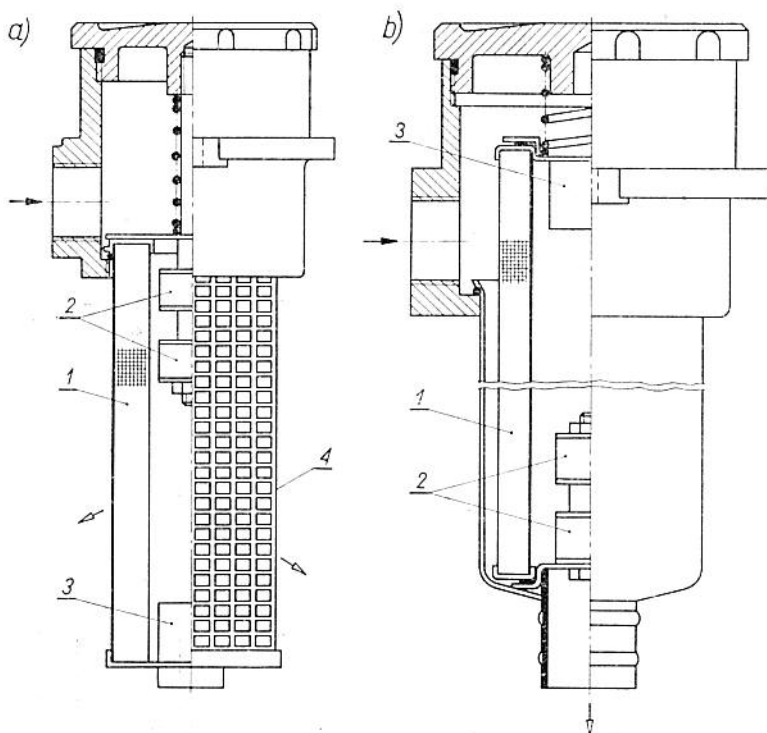
Rys. 3.76. Filtr siatkowy z wkładem magnetycznym; 1 — korpus, 2 — siatkowy segment filtracyjny, 3 — osłona (osadnik), 4 — magnes stały

dopodobnie powoduje polaryzację, a następnie koagulowanie małych cząstek zanieczyszczeń i osadzanie się ich na powierzchni siatki segmentów 2 wkładu filtracyjnego. Zastosowanie osłony miseczkowej z blachy niemagnetycznej na magnesie ułatwia usunięcie osiadłych cząstek ferromagnetycznych.

W rozwiązaniu wkładów filtracyjnych produkowanych przez firmę MP Filtri Per Oleodinamica (Milano, Włochy) zastosowano magnesy stałe, umieszczone w przestrzeni „wewnętrznej” wkładu siatkowego (rys. 3.77). Ciecz przechodząca w całości przez wkład

filtracyjny, oczyszczona, obmywa walcowy zestaw magnetyczny. Wskutek takiego usytuowania magnesów jest możliwe zatrzymanie dodatkowo cząstek o wymiarach mniejszych niż wynikałoby to z zastosowanego materiału porowatego.

W odmienny sposób działają, ze względu na specyficzną konstrukcję, filtry magnetyczne Sommermayer. Fotografie budowy



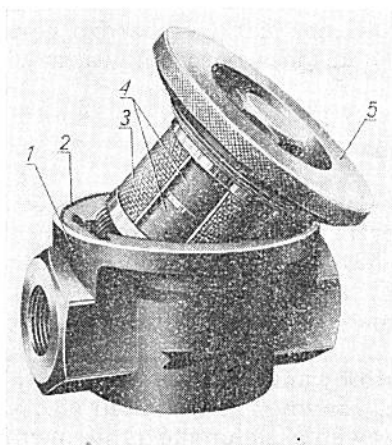
Rys. 3.77. Filtr splotkowy siatkowo-magnetyczny firmy MP (Włochy) serii „SRTS”; 1 — wkład siatkowy, 2 — blok magnesów stałych, 3 — zawór przelewowy, 4 — osłona wzmacniająca

tych filtrów przedstawiono na rys. 3.78. Schemat konstrukcyjny filtru magnetycznego MS 25 (niskociśnieniowego) pokazano na rys. 3.79.

Filtry Sommermayer znajdują różnorodne zastosowanie. Filtry typu Micro-S-Filter znalazły zastosowanie zarówno w filtrowaniu i polepszaniu własności olejów, jak i cieczy stanowiących czynniki chłodzące w instalacjach chłodniczych (NH_3 lub CF_2Cl_2 — freon).

W celu sprawdzenia skuteczności działania tych filtrów prze-

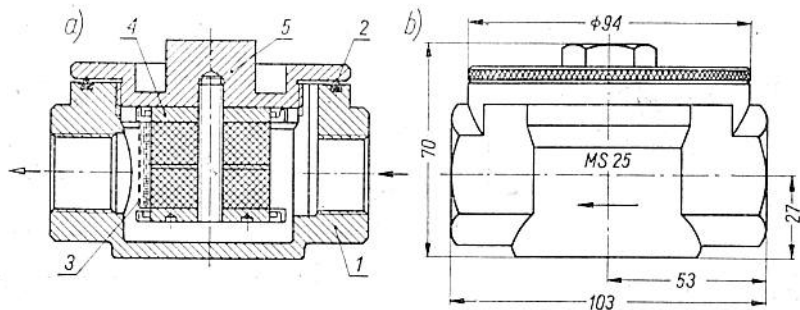
proawdzono badania w NRD, CSRS i Polsce. Z badań tych wynika, że zastosowanie filtrów magnetycznych typu Micro-S-Filter znacznie przedłużyło czas pracy (o ok. 5%) oleju K-12 w silnikach



Rys. 3.78. Filtr mikronowy Sommermayer Typu Micro-S-Filter; 1 — kadłub, 2 — pierścień uszczelniający, 3 — zespół siatki, 4 — zespół magnesów, 5 — pokrywa

Diesla. Na przykład przy porównaniu filtrów typu Micro-S z filtrem szczelinowym, stwierdzono że olej znajdujący się w obiegu układu z filtrem mechaniczno-magnetycznym może pracować 1,5 razy dłużej. Ponadto olej ten ma lepsze własności, np. mniejszą liczbę kwasową i mniejszą zawartość popiołu. Podwyższa się także temperatura zapłonu oleju filtrowanego filtrem typu Micro-S.

Inne zastosowania filtrów magnetycznych Sommermayer są następujące:



Rys. 3.79. Schemat filtra magnetycznego MS25 (Sommermayer): a) przekrój, b) podstawowe wymiary zewnętrzne; 1 — kadłub, 2 — pierścień uszczelniający, 3 — zespół siatki, 4 — zespół magnesów, 5 — pokrywa

— filtry Micro-S — w urządzeniach hydraulicznych, obrabiarkach, silnikach spalinowych, osprzęcie pływomym maszyn okrętowych, turbinach, maszynach roboczych i pojazdach, urządzeniach smarowniczych;

— filtry Mikro-S bez siatki — bardzo gęste płyny, takie jak oleje, ciękla czekolada, masa porcelanowa, zawiesina włókninowa itp.;

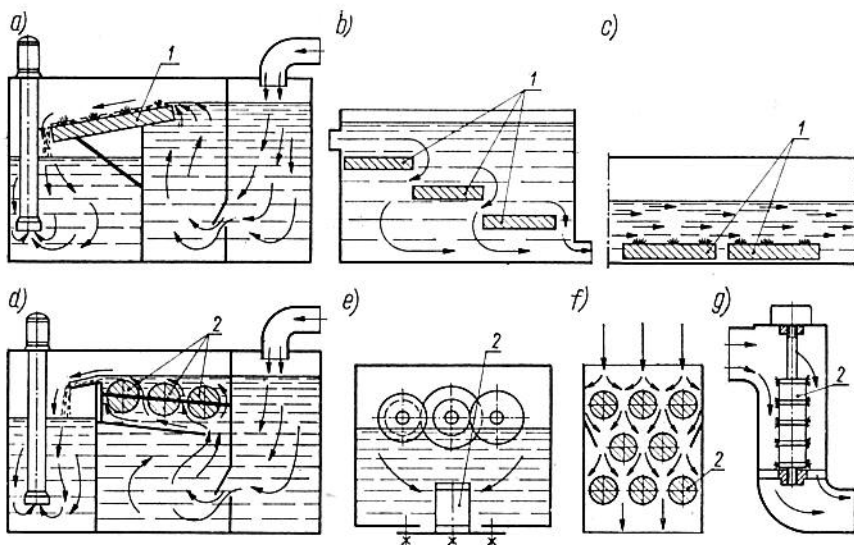
— filtry Micro-S niskociśnieniowe (do 16 kG/cm^2) — w liniach o bardzo dużych natężeniach wynoszących od 200 do 10 000 l/min;

— filtry magnetyczne typu ND 100 — w urządzeniach, których ciśnienie nie przekracza 100 kG/cm^2 ;

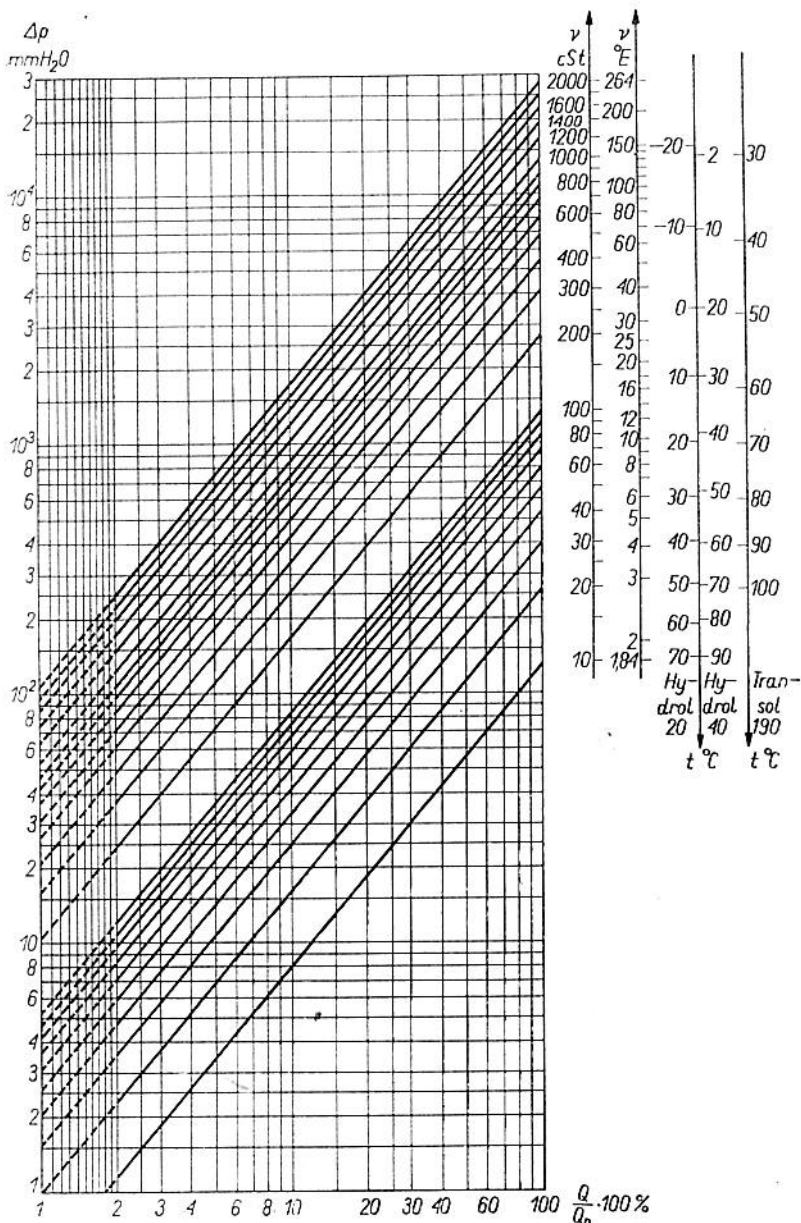
— filtry typu ND 320 — w liniach o ciśnieniu do 320 kG/cm^2 , w zakresie natężeń przepływu do 100 l/min.

Zasada działania i własności filtracyjne tych filtrów są omówione w rozdz. 4.

Przykłady zastosowania filtrów magnetycznych o kształcie płytowym i cylindrycznym w filtrowaniu cieczy pokazano na rys. 3.80. Układy instalowania są proste i nie wymagają specjalnego omawiania. Filtry magnetyczne różnych kształtów, jak filtry ty-



Rys. 3.80. Różne zastosowania i układy instalowania filtrów magnetycznych płytowych i cylindrycznych: a, b) filtry płytowe w zbiorniku cieczy, c) filtry płytowe w kanale przepływowym, d) filtry cylindryczne w zbiorniku cieczy, e) filtr cylindryczny w skrzyni smarowej przekładni, f) palisada filtrów cylindrycznych, g) filtr cylindryczny w kanale przepływu cieczy; 1 — filtr płytowy, 2 — filtr cylindryczny



Rys. 3.81. Rodzina charakterystyk przepływowych filtrów Sommer Mayer MS-10, MS-25, MS-63ND100, MS-100 dla różnych lepkości olejów produkcji krajowej

pu Micro-S są produkowane przez firmę Heinrich Sommermayer KG, Filtertechnik Magnetbau, Gera (NRD). W filtrach magnetycznych występują małe opory przepływu, a więc nie zmieniają się ich charakterystyki w czasie filtrowania. Na rys. 3.81 podano rodzinę charakterystyk przepływowych filtrów Micro-S dla olejów krajowych.

3.7. Filtry ciekłych metali

Filtry ciekłych metali stanowią wyposażenie urządzeń wykorzystujących ciekły metal jako płyn roboczy (hydromagnetyczna technika sterowania, wymienniki ciepła i inne). W układzie z ciekłym metalem są stosowane następujące rodzaje filtrów:

— *filtry porowate* — oczyszczanie z zanieczyszczeń mechanicznych,

— *filtry energetyczne* — oddzielanie gazów i par najczęściej w wyniku wykorzystania działania sił odśrodkowych,

— *filtry — pułapki wewnętrzne* — oddzielanie i wychwytywanie z ciekłego metalu tlenków i innych związków oraz wtrąceń,

— *filtry — pułapki zwrotne* — oczyszczanie gazów usuwanych z urządzenia z kropli ciekłego metalu zabieranych przez strumień tego gazu podczas wypływu,

— *urządzenia oczyszczające* — oczyszczanie z wykorzystaniem innych zjawisk fizyko-chemicznych.

Filtry ciekłych metali wraz z pomocniczym wyposażeniem oczyszczającym są wykonywane najczęściej w postaci konstrukcji specjalnie projektowanych dla każdego przypadku. Często w konstrukcję urządzenia oczyszczającego i filtru jest wmontowany system nagrzewania i chłodzenia ciekłego metalu.

Filtry porowate stosowane w układach z ciekłym metalem są wykorzystywane w cyklu pracy ciągłej lub okresowej. Filtry te są instalowane zarówno przy napełnieniu zbiornika ciekłym metalem, jak i na wyjściu ze zbiornika (ssanie lub opróżnianie). Materiały porowate wykorzystywane do filtrowania ciekłych metali przed użyciem są przetrzymywane w tyglu przez okres kilku (3 do 5) godzin w temperaturze wyższej od nominalnych warunków pracy o ok. $5\div 10\%$. Stosowane materiały porowate charakteryzują się stosunkowo dużymi oporami przepływu. Na przykład w temperaturze ok. 400°C ciężarowe natężenie przepływu ciekłego sodu przez filtr o dokładności $10\ \mu\text{m}$ wynosi $0,5\ \text{kg}/(\text{h} \cdot \text{cm}^2)$ przy spadku ciśnienia $1\ \text{kG}/\text{cm}^2$. Do kontroli spadku ciśnienia na filtry w czasie pracy są stosowane manometry różnicy ciśnień.

Najczęściej stosowanymi materiałami na wkłady filtracyjne filtrów porowatych do oczyszczania metali alkalicznych są stale nierdzewne, stal typu H18N9T.

Różne są formy realizacji przestrzeni porowatej. Wkłady filtracyjne są budowane z luźno zasypanego proszku, wiórów (porowatość objętościowa ok. 80%) lub włókien, siatek tkanych i spiekanych, spieków granulkowych, zwojów wielowarstwowych siatek zgrubnych itp. Wkłady filtracyjne filtrów porowatych charakteryzują się małymi wymiarami porów (5÷15 μm). Grubości przegród porowatych wykonanych metodami metalurgii proszków, stosowanych we wkładach filtrów mechanicznych, wynoszą od 1,8 do 15 mm.

Podobnie jak w urządzeniach hydraulicznych typu konwencjonalnego, filtry porowate ciekłych metali są poddawane regeneracji. Regeneracja wkładu filtracyjnego odbywa się przez przedmuchiwanie azotem lub czystym sodem w przeciwnym kierunku. Wymagana jest objętość ok. 0,3 m³ czynnika myjącego na 1 m² powierzchni materiału filtracyjnego.

Filtry-pułapki wewnętrzne i zwrotne mogą być „zimne” — ochładzane powietrzem, wodą, toluenem, olejem silikonowym, stopem NaK itp., albo „gorące” — ustawiane w odcinku układu o najwyższej temperaturze lub na względnie schłodzonym odcinku i podgrzewane do najwyższej temperatury układu.

Filtry-pułapki „zimne” są budowane jako *elementy dyfuzyjne*, w których oczyszczanie ciekłego metalu z zanieczyszczeń następuje w wyniku ich dyfuzji z odcinków urządzenia o wysokiej temperaturze, na skutek obniżenia rozpuszczalności zanieczyszczeń w temperaturze niższej, oraz jako *elementy przepływowe* (o przepływie wymuszonym) *ochładzane*, w których oczyszczenie następuje w wyniku osadzania zanieczyszczeń i filtrowania mechanicznego.

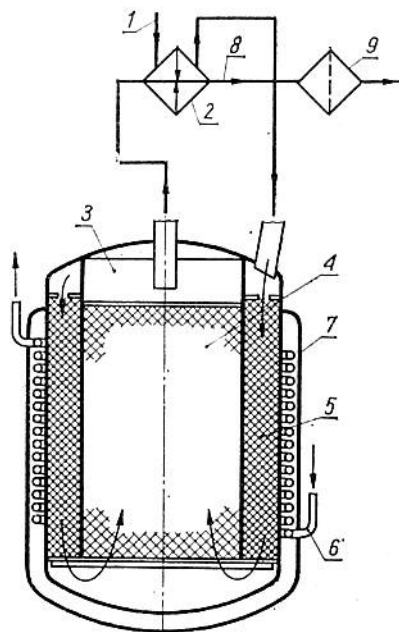
Objętość przestrzeni filtrów-pułapek „zimnych” przyjmuje się nie większą niż 1—3% objętości ciekłego metalu w urządzeniu, natomiast dopuszczalna ilość zanieczyszczeń osiadłych w takim filtrze nie powinna przekraczać 20% (wagowo) objętości ciekłego metalu wypełniającego filtr.

Długość drogi ciekłego metalu w strefie filtrowania filtrów-pułapek wynosi ok. 400 mm. Powierzchnia kontaktu z ciekłym metalem na wydłużonej drodze przepływu jest duża. Materiałami stosowanymi na filtry-pułapki są podobnie jak w filtrach porowatych, stale nierdzewne, np. typu H18N9T.

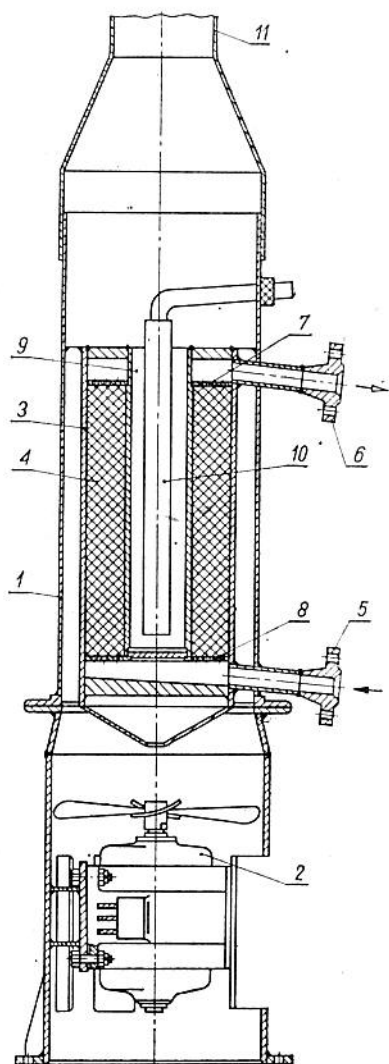
Przy dużych natężeniach przepływu ciekłego metalu, filtry-pułapki są instalowane w układzie częściowego oczyszczania. Na przykład w reaktorze atomowym z chłodzeniem ciekłym sodem

(reaktor SRE, USA) natężenia przepływu przez pętlę główną, pomocniczą i filtr-pułapkę wynoszą odpowiednio: 220 000, 11 000 i 610 kg/h.

Prędkość przepływu ciekłego metalu przez strefę filtracyjną przyjmuje się na ogół nie większą niż 20÷30 cm/min. Przy projektowaniu filtrów-pułapek dąży się do wyboru takich przekrojów przepływowych strefy chłodzenia, odstojnika i filtracyjnej, aby



Rys. 3.82. Schemat filtru ciekłego metalu z chłodzeniem cieczą i podgrzewaniem oszczędzaczem



Rys. 3.83. Schemat filtru ciekłego metalu z chłodzeniem powietrznym

prędkości przepływu były w przybliżeniu jednakowe, oraz aby w strefie odstoju nie wystąpiły jakiegokolwiek zawirowania.

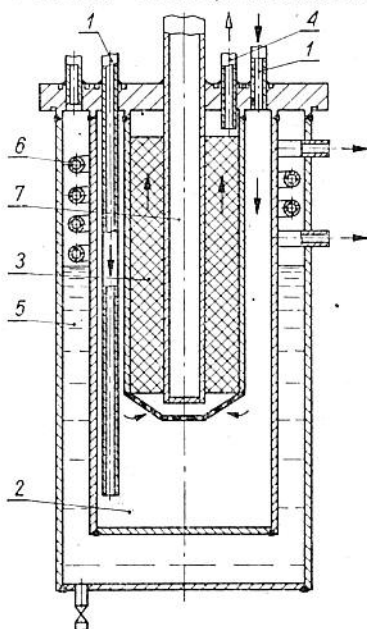
Na rys. 3.82 przedstawiono schemat filtru-pułapki chłodzonej cieczą. Ciekły metal o wysokiej temperaturze przechodzi z układu przewodem 1 do przestrzeni wymiennika ciepła 2 typu oszczędzacza, gdzie zmniejsza się jego temperatura, a następnie przepływa do właściwego filtru-pułapki 3. Przestrzeń filtrująca 1 jest wypełniona włóknem ze stali nierdzewnej (drut łamany). Przepływ ciekłego metalu następuje przez przestrzeń zewnętrzną 5 otoczoną węzownicą 6 umieszczoną w płaszczu chłodzącym 7, a następnie przez wkład filtracyjny do nagrzewnicy 2. Wskazane jest zastosowanie na wyjściu 8 dodatkowo metalowego filtru mechanicznego 9 w postaci przegrody porowatej o dokładności oczyszczania ok. 5 μm .

Na rys. 3.83 przedstawiono schemat konstrukcyjny filtru-pułapki do oczyszczania ciekłych metali stosowanych jako wymienniki ciepła (sód, potas). Do obudowy 1 jest zamocowany silnik z wentylatorem 2 chłodzącym z zewnątrz powietrzem wkład filtracyjny 3. Materiał filtracyjny 4 stanowią wióry ze stali nierdzewnej. Wkład filtracyjny w postaci kształtującego kadłuba cylindrycznego jest wyposażony w przewody dopływu 5 i odpływu 6 ciekłego metalu. W kadłubie tym między siatką górną 7 a dolną 8 oraz wewnętrzną komorą 9 znajduje się materiał filtracyjny. W komorze 9 jest umieszczony element nagrzewający 10. Górna część 11 obudowy 1 jest wyposażona w zawór nastawiający intensywność chłodzenia przez zmianę przepływu powietrza (nie pokazano na rysunku).

Filtr-pułapkę do oczyszczania ciekłego sodu, z chłodzeniem wrzącym toluenem i kondensatem wodno-toluenowym, przedstawiono na rys. 3.84. Dopływający pod ciśnieniem 60÷100 m nad przewodami 1, ciekły sód przechodzi przez chłodzoną strefę osadzania 2, wkład filtracyjny 3 wypełniony wiórami ze stali nierdzewnej o gęstości wypełnienia 1000 kg/m^3 i wypływa przewodem wyjściowym 4. Zewnętrzną część filtru stanowi komora 5 wypełniona w części toluenem odbierającym ciepło od sodu (temperatura robocza układu wynosi 110÷550°C). Pod wpływem ogrzewania toluen wrze i jego pary pod ciśnieniem 0,5÷3 kg/cm^2 ulegają kondensacji w górnym obszarze komory na skutek ich oziębiania przy kontakcie z powierzchnią węzownicy 6 chłodzonej wodą. Wstępne podgrzanie zapewnia nagrzewnica 7 umieszczona wewnątrz wkładu filtracyjnego.

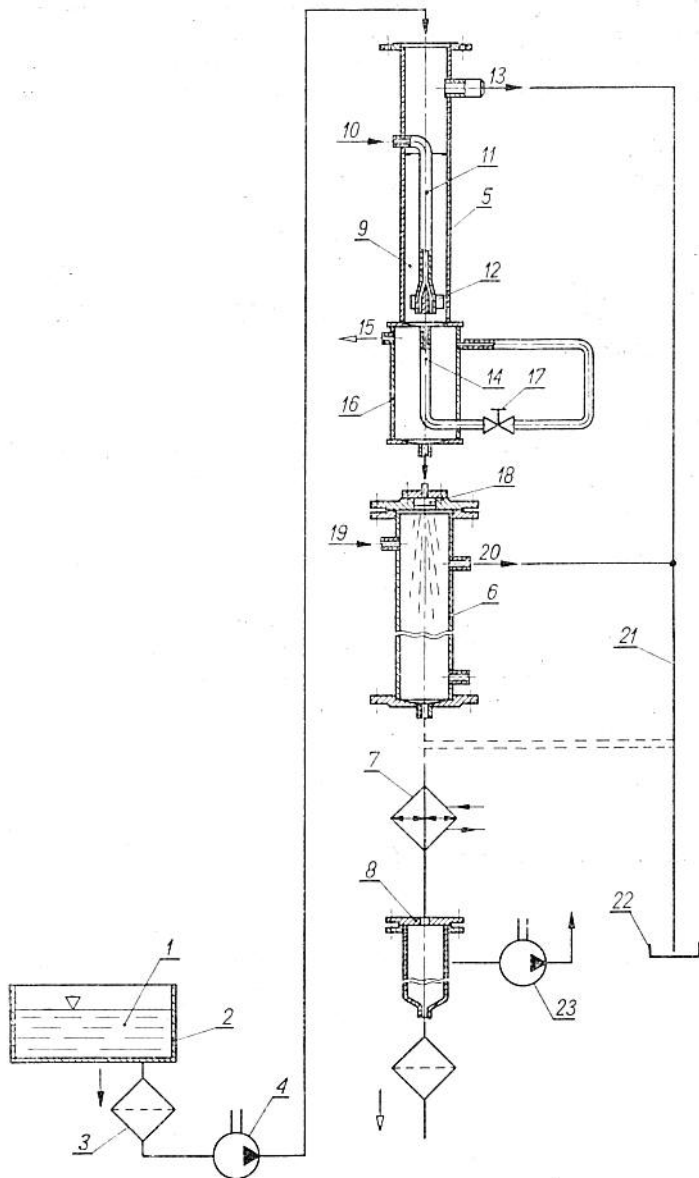
Oczyszczanie rtęci z zanieczyszczeń mechanicznych dokonuje się przy zastosowaniu filtrów, których wkład filtracyjny jest wykonany z porowatych materiałów nie reagujących z rtęcią. Stosowane są siatki i spieki granulkowe z platyny, porowate żeliwo oraz specjalnie spreparowana skóra.

Często w urządzeniach wykorzystujących rtęć jest wymagana tak wysoka jej czystość, że zastosowanie tylko filtrów porowatych jest niewystarczające. Stosowane są wówczas bardziej złożone układy wielostopniowego oczyszczania: mechanicznego, przemycania wodą, oczyszczania alkalicznie, kwasami i inne.



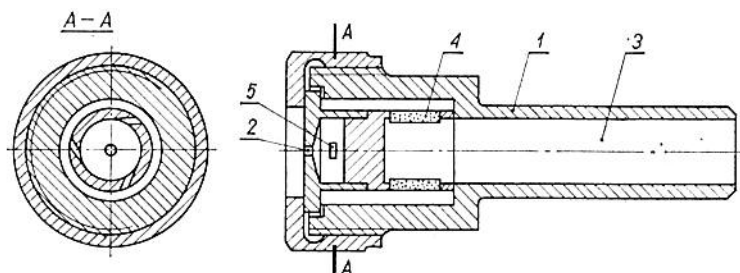
Rys. 3.84. Schemat filtru z chłodzeniem wrzącym toluenem

Przykład takiego urządzenia do oczyszczania rtęci przedstawiono na rys. 3.85. Rtgę 1 zasysana ze zbiornika 2 poprzez filtr mechaniczny 3 jest tłoczona pompą 4 do kolumny oczyszczającej. Kolumna jest złożona z oczyszczalnika wodnego 5, alkalicznego 6 i kwasowego (nie pokazano na rysunku, o konstrukcji takiej samej jak 6), a za każdym z nich są również umieszczone oczyszczalniki wodne. Następnie oczyszczona rtęć przechodzi przez wymienniki ciepła (podgrzewacz) 7, aspirator gazów i par ciecży 8 oraz ewentualnie przez filtr porowaty dokładnego oczyszczania. Oczyszczalnik wodny 5 działa w ten sposób, że wtłoczona do górnej komory 9 rtęć jest okresowo przemycana czystą wodą przepływającą od wlotu 10 przez przewód 11 zakończony wibratorem 12 do wylotu 13. Następnie przemyta rtęć przepływa do dolnej komory 16 oczyszczalnika przez zamek hydrauliczny 14 wyposażony w zawór 17 uniemożliwiający dalszy sływ wody. Przewodem 15 dostaje się powietrze.



Rys. 3.85. Schemat urządzenia do oczyszczania rtęci

Oczyszczalnik alkaliczny 6 (lub kwasowy) jest naczyniem, do którego rtęć dostaje się przez wtryskiwacz 18. Wtryskiwacz (rys. 3.86) jest zbudowany w ten sposób, że rtęć przechodzi przez filtr mechaniczny i otwór 4 umieszczone stycznie w kadłubie cylindrycznym, a następnie w stanie już rozpylonym przez otwór 2 do



Rys. 3.86. Wtryskiwacz rtęci stosowany w oczyszczalnikach alkalicznych i kwasowych kolumny oczyszczającej; 1 — kadłub wtryskiwacza, 2 — otwór wylotowy, 3 — otwór dopływowy, 4 — filtr porowaty, 5 — styczne kanały rozpylające

naczynia. Otworem wlotowym 19 są tłoczone czyszczące związki alkaliczne lub kwasy, które otworem wylotowym 20, podobnie jak woda, są kierowane do przewodu zbiorczego 21 i zbiornika drenazowego 22. Aspirator gazów i par ciecży 8 jest komorą mającą w górnej części otwór połączony z pompą próżniową 23 przeznaczoną do usuwania zgazowanych, w wyniku podgrzania rtęci, pozostałości z ciecży czyszczących.

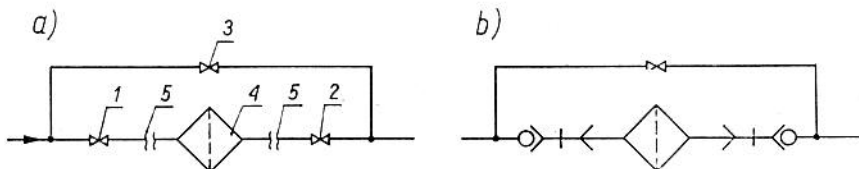
3.8. Złącza i zawory filtrów

Zadawalające użytkowanie filtrów ciecży i gazów zależy w dużej mierze od stopnia wyposażenia filtrów w urządzenia pomocnicze. Stanowią one jednocześnie ważny element ułatwiający obsługę filtrów. Przegląd konstrukcji urządzeń pomocniczych filtrów zaczniemy od złączy i zaworów, które spełniają zasadniczą rolę w sposobie instalowania i wykorzystania tych filtrów. Złącza filtrów ze współpracującymi przewodami linii płynowej powinny być szczelne, przy czym ich budowa powinna być taka, aby wymiana filtru lub wkładu filtracyjnego była szybka i łatwa. Niejednokrotnie wymaga się, aby wymiana lub naprawa wkładu filtracyjnego odbywała się bez konieczności demontażu korpusu filtru i przerwania przepływu płynu, albo też aby podczas wymiany wkładu

następowało odcięcie przewodów doprowadzenia i odprowadzenia płynu.

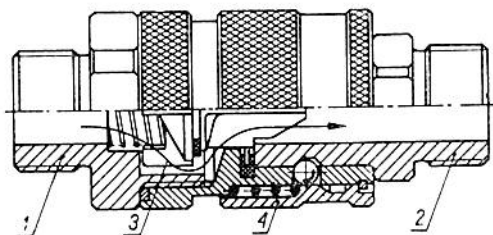
Realizacja takiego zadania odbywa się przez zastosowanie zaworu kierunkowego, a w najprostszym przypadku wymaga umieszczenia specjalnych zaworów, tak jak to pokazano na rys. 3.87. W czasie eksploatacji filtr 4 połączony z linią przepływu płynu złączami 5 dowolnej konstrukcji pracuje wtedy, gdy zawory 1 i 2 są otwarte, a zawór 3 jest zamknięty. Wymianę filtra lub wkładu filtracyjnego można zrealizować bez przerywania przepływu płynu — przez otwarcie zaworu 3 i zamknięcie zaworów odcinających 1, 2 i 3. Wymianę wkładu filtracyjnego lub filtru z przerywaniem przepływu płynu można wykonać przy zamkniętych zaworach 1 i 2. Taki sposób postępowania komplikuje obsługę, a w przypadku zastosowania zaworów odcinających zamykanych ręcznie wydłuża cykl wymiany.

Usprawnienia obsługi można dokonać stosując zamiast zaworów odcinających 1 i 2 oraz dodatkowych złącz przewodowych 5 specjalnej konstrukcji złącza szybkozłączalne (szybkozłącza) (rys. 3.87b). Przykład konstrukcji takiego złącza przedstawiono na rys.



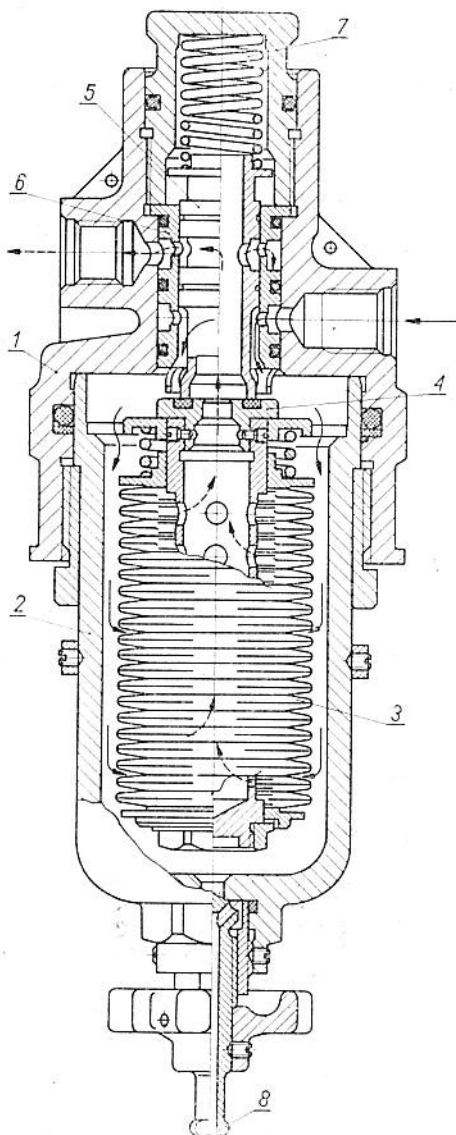
Rys. 3.87. a) Umiejscowienie zaworów odcinających dla wymiany filtra lub wkładu filtracyjnego, b) zastosowanie złączy szybkozłączalnych

3.88. Końcówka 1 jest połączona z przewodem wejściowym płynu, a końcówka 2 — z filtrem. W stanie połączeniowym płyn przepływa swobodnie do filtra w kierunku pokazanym strzałką 3. Rozłączenia można dokonać przesuwając tuleję 4 w lewo, co spowoduje



Rys. 3.88. Schemat konstrukcyjny złącza szybkozłączalnego z przewodem zamykanym zaworem zwrotnym (Walther Präzision)

rozsunięcie się zespołów złącza i jednocześnie zamknięcie dopływu płynu od strony końcówki 1. Rozwiązanie konstrukcyjne złączy szybkorozłączalnych zależy od ciśnienia płynu roboczego i od dopuszczalnych oporów przepływu.



Rys. 3.89. Filtr wyposażony w zawór odcinający

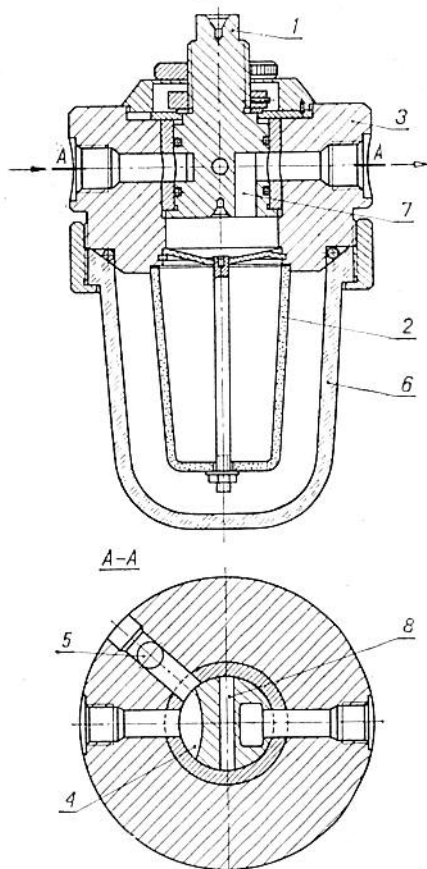
Innym rozwiązaniem zabezpieczenia przepływu płynu lub odcięcia przepływu jest wyposażenie filtra w *zawór odcinający* lub *przełączający*. Przykład wbudowania zaworu odcinającego w filtr cieczy przedstawiono na rys. 3.89. Połączenie filtra z linią hydrauliczną jest dokonane przy użyciu normalnych złącz, natomiast konstrukcja kadłuba 1, obudowy 2 i wkładu filtracyjnego 3, umożliwia wyjęcie wkładu bez konieczności odłączenia filtra od linii. Podczas pracy wkład filtracyjny 3, osadzony w obudowie 2, dociska przez gniazdo 4 czoło suwaka rozdzielczego 5 osadzonego w tulei 6 i wydrążonego wewnątrz tak, że następuje przepływ przefiltrowanej cieczy do wylotu filtra. Odkręcanie obudowy 2 powoduje przesuw suwaka 5 w nieruchomej tulei 6 pod wpływem nacisku sprężyny 7, tak iż nastąpi zamknięcie przewodów wlotowego i wylotowego filtra. Przy montażu wkładu filtracyjnego następuje otwarcie zaworu przepływu cieczy w chwili, gdy obudowa 2 zajmuje graniczne położenie górne w kadłubie 1 filtra. Dodatkowe wyposażenie obudowy filtra w zawór odcinający 8, zakończony przewodem spustowym, umożliwia usuwanie osadu z filtra bez konieczności wyjmowania wkładu filtracyjnego.

W przypadku zastosowania filtrów w układach, w których jest dopuszczalny przepływ płynu niefiltrowanego w czasie ich pracy stosuje się zamiast zaworów odcinających (jak na rys. 3.89) *zawór przełączający*, który umożliwia, po odłączeniu wkładu filtracyjnego pełny przepływ płynu. Konstrukcja zaworu jest taka, że przesuw tłoka powoduje zwarcie przewodu wlotowego i wylotowego płynu, a jednocześnie odcięcie kanału wlotowego od przestrzeni łączącej się z wkładem filtracyjnym.

Zawory kierunkowe stosuje się często w filtrach stacji zasilania pneumatycznego. Przykładem jest konstrukcja przedstawiona na rys. 3.90. Zawór kierunkowy 1 znajdujący się w pozycji jak na rysunku zapewnia przepływ powietrza przez wkład filtracyjny 2 w ten sposób, że powietrze kanałem wlotowym kadłuba 3 przechodzi przez boczne wycięcie zaworu 4 do przewodu 5 połączonego z komorą obudowy filtra 6, a następnie kanałem 7 łączy się z wylotem filtra w kadłubie 3. Obrót o 90° zaworu 1 powoduje odcięcie komory obudowy filtra 7 i połączenie kanałem 8 bezpośrednio wlotu i wylotu filtra. W takiej pozycji jest możliwe odłączenie obudowy 6 i wymiana wkładu filtracyjnego 2.

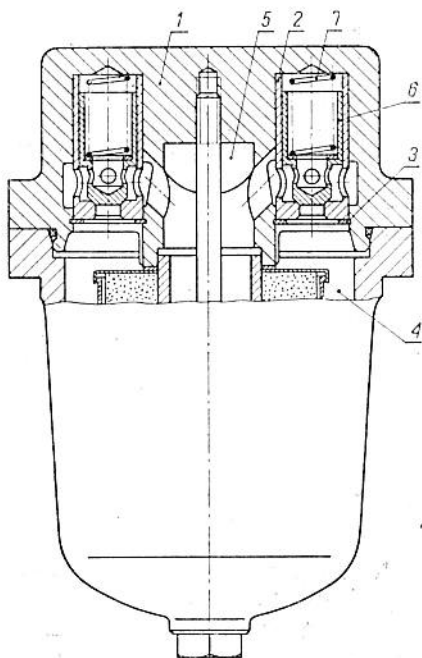
Niejednokrotnie stosuje się *zawór kierunkowy zewnętrzny* służący do kolejnego przełączania w układzie wyposażonym w dwa jednakowe filtry. W takim przypadku jeden filtr jest rezerwowym i przy włączeniu w cykl filtrowania drugiego filtra, może być demontowany. Taki zawór może być sterowany bezpośrednio ciśnieniem w instalacji pływowej oraz wyposażony w system sygnalizacji.

Większość konstrukcji filtrów, w których dopuszcza się upust płynu niefiltrowanego oraz ze względów wytrzymałościowych wkładu filtracyjnego nie dopuszcza się do powstania nadmiernych spadków ciśnienia, wyposaża się w *zawory przelewowe* działające samoczynnie. Rola spełniana przez zawory przelewowe jest też taka, że w przypadku rozruchu urządzenia hydraulicznego, w którym najczęściej temperatura cieczy jest niższa od temperatury pracy, zawory przelewowe otwierają się, a w miarę wzrostu tempera-

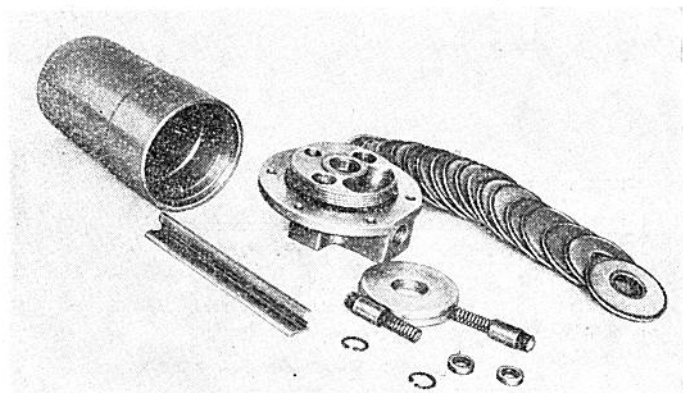


Rys. 3.90. Schemat filtru pneumatycznego z zaworem kierunkowym

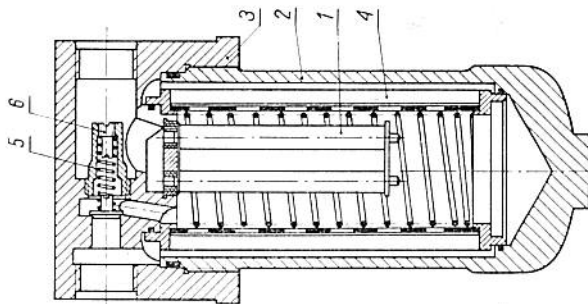
tury, a więc zmniejszenia się lepkości cieczy i spadku ciśnienia, ulegają zamknięciu. Schemat konstrukcyjny filtru wyposażonego w dwa takie zawory przelewowe przedstawiono na rys. 3.91 oraz filtr z wymontowanymi zaworami przelewowymi — na rys. 3.92.



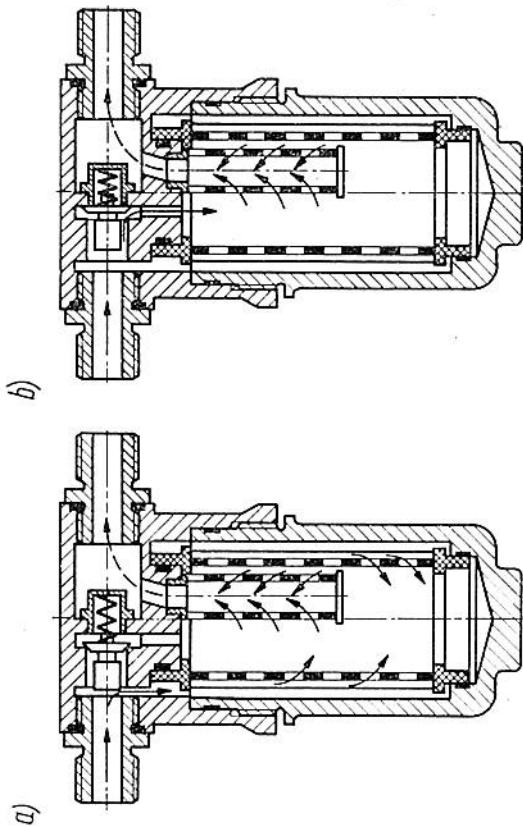
Rys. 3.91. Sposób wbudowania i konstrukcja zaworów przelewowych filtru hydraulicznego



Rys. 3.92. Widok filtru siatkowego z wymontowanymi zaworami przelewowymi



Rys. 3.93. Schemat konstrukcji filtru z zaworem przelewowym spełniającym rolę zaworu kierunkowego

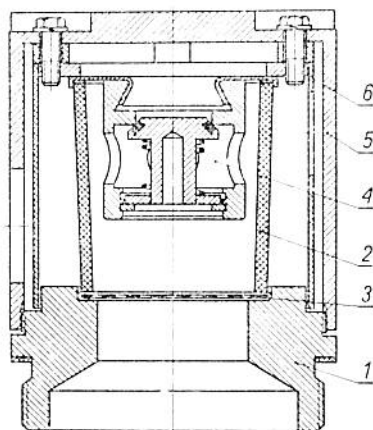


Rys. 3.94. Działanie zaworu przelewowego w filtrze wyposażonym w dwa wkłady filtracyjne: a) przepływ cieczy przy zaworze zamkniętym, b) przepływ przy zaworze otwartym

Na rys. 3.91 gniazdo zaworu 2 wcisnięte w kadłub filtru 1 i zabezpieczone pierścieniem sprężynującym 3 ma wycięcia łączące ze stroną wyższego ciśnienia wlotu 4 filtru oraz komorę wypływu 5 z filtru. W wewnętrznej cylindrycznej części gniazda znajduje się przesuwny zawór 6 dociskany do gniazda sprężyną 7. Sztywność sprężyny jest dobierana w zależności od dopuszczalnego spadku ciśnienia na wkładzie filtracyjnym.

Zawory przelewowe spełniają w wielu przypadkach również rolę *zaworów kierunkowych*. Ma to miejsce wszędzie tam, gdzie nie dopuszcza się przepływu płynu niefiltrowanego. Na rys. 3.93 pokazano takie zastosowanie zaworu przelewowego. W tym przypadku zawór przelewowy 5 umieszczony w kadłubie 3 filtru otwiera (przy nadmiernym zwiększeniu się różnicy ciśnień na głównym wkładzie filtracyjnym 4) kanał do pomocniczego zespołu wkładów filtracyjnych 1 najczęściej o mniejszej dokładności filtrowania. Oba wkłady znajdują się w jednej obudowie 2 filtru. Wkręt 6 w zaworze przelewowym 5 umożliwia nastawienie różnicy ciśnień otwierających zawór, zależnie od lepkości stosowanego w układzie płynu roboczego. Schemat działania filtru przy zamkniętym i otwartym zaworze przelewowym pokazano na rys. 3.94.

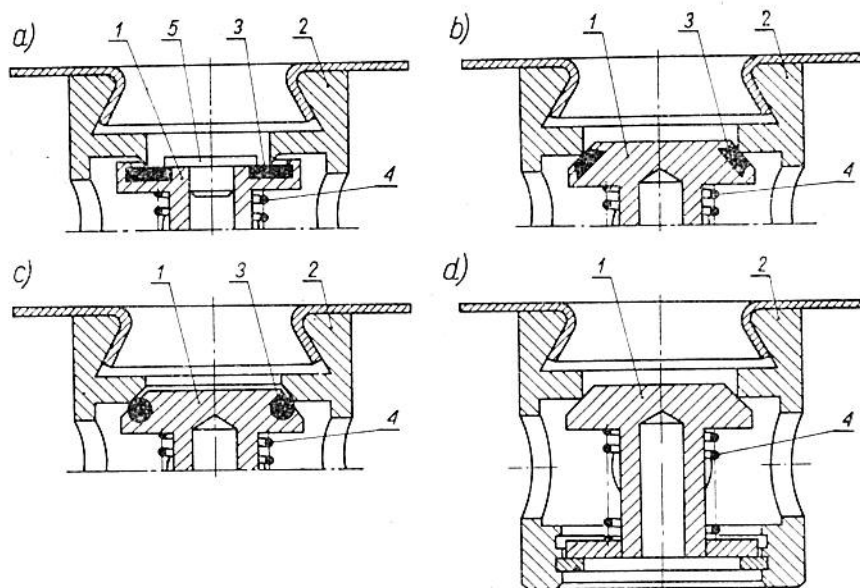
Istnieją też przypadki zastosowań *zaworów zabezpieczających* instalowanych w zbiornikowych filtrach odpowietrzających. Dotyczy to głównie takich przypadków, w których zbiornik oraz umieszczony na nim filtr powietrza ulegają silnemu zanieczyszczeniu.



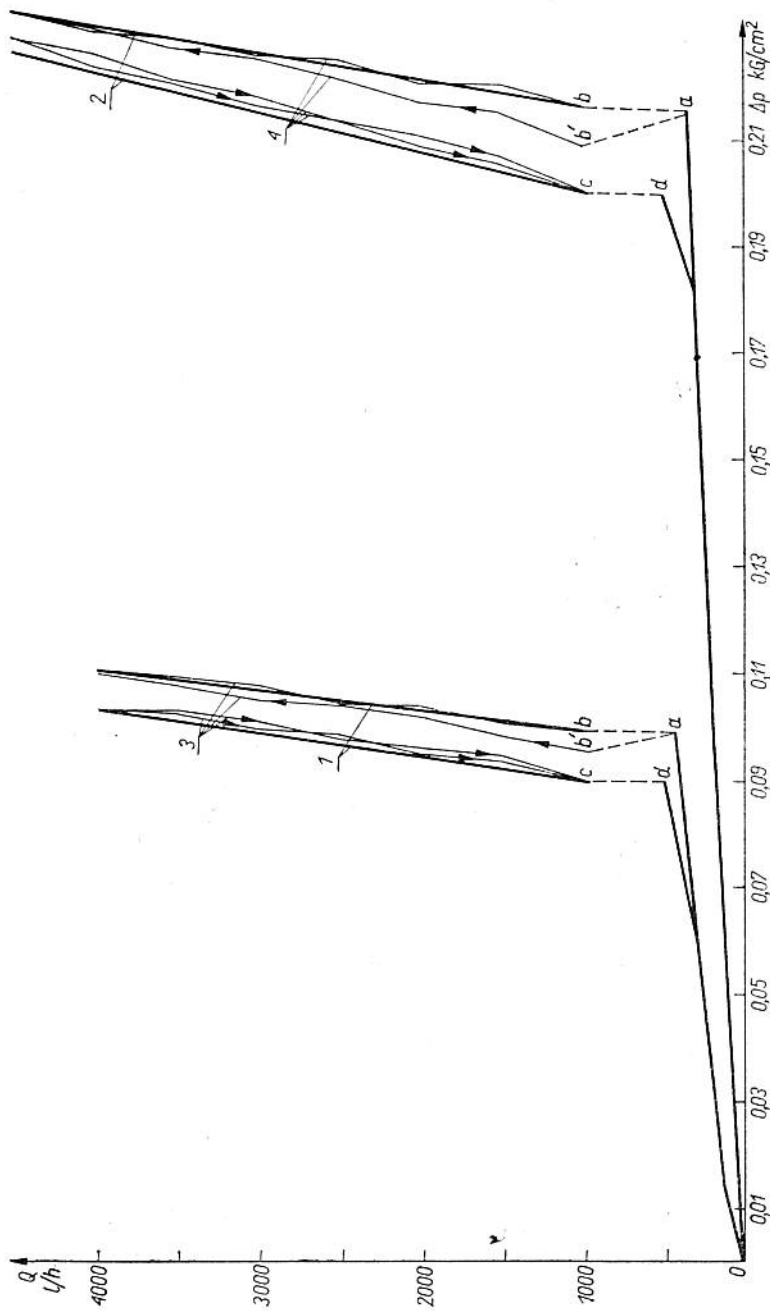
Rys. 3.95. Zbiornikowy filtr powietrza; 1 — kadłub filtru mocowany do górnej połowy zbiornika, 2 — wkład filtracyjny dokładnego oczyszczenia, 3 — sito filtracyjne, 4 — zawór zabezpieczający, 5 — osłona zewnętrzna, 6 — osłona pomocnicza

niu wskutek dużego zapylenia powietrza lub rozbryzgów rozwodnionego gruntu (koparki, ciągniki rolnicze, maszyny budowlane itp.). Nawet przy dużej powierzchni materiału wkładu filtracyjnego, może on ulec silnemu zanieczyszczeniu, a gdy ruch poziomy cieczy w zbiorniku jest szybki, może doprowadzić do szkodliwych zmian ciśnienia splywu i ssania. Oprócz wyposażenia takiego filtra w specjalne osłony zabezpieczające (rys. 3.95), instaluje się więc również opisane zawory zabezpieczające.

Szczelność połączenia grzybek-gniazdo zaworu jest realizowane rozmaicie (rys. 3.96). Chodzi tu głównie o to, aby histereza ruchu była jak najmniejsza ze względu na małe różnice ciśnień oraz aby zapewniona była dobra szczelność. Przykłady charakterystyk statycznych dwu zaworów przedstawiono na rys. 3.97, na którym uwidoczniło przecieki powietrza wynoszące ok. 500 l/h przy różnicy ciśnień bliskiej ciśnieniom otwarcia (punkty a, b) oraz zamknięcia (punkty c, d).



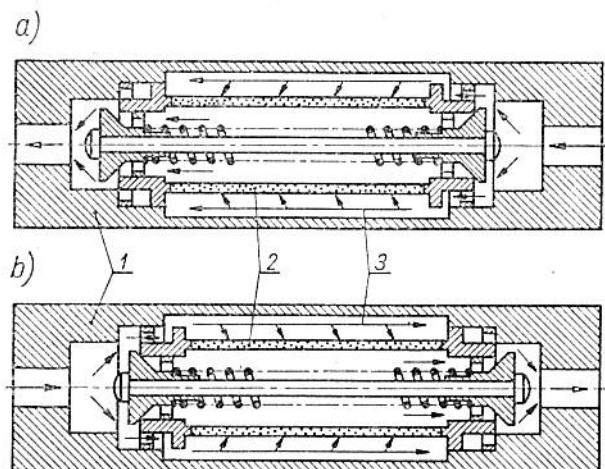
Rys. 3.96. Odmiany konstrukcyjne zaworu zabezpieczającego zbiornikowego filtra powietrza: a) zawór z uszczelką gumową o przekroju prostokątnym, zamocowaną kołnierzem trzpienia 5, b) zawór z uszczelką gumową zawulkanizowaną w grzybek, c) zawór z uszczelką gumową o przekroju okrągłym, d) zawór z uszczelnieniem za pomocą krawędzi metalowych; 1 — grzybek zaworu, 2 — korpus zaworu, 3 — uszczelka 4 — sprężyna do-diskowa, 5 — trzpień



Rys. 3.97. Przykładowe charakterystyki statyczne zaworów zbiornikowych filtrów powietrza; 1, 2 — przykładowe charakterystyki zaworów dla ciśnień otwarcia odpowiednio ok. 0,1 i 0,2 kg/cm^2 ; 3, 4 — przykłady rzeczywistych zależności przepływu i spadku ciśnienia na zaworze

Specjalnym zagadnieniem konstrukcyjnym jest budowa filtrów dwukierunkowych szczególnie w układach hydraulicznych. Zawory kierunkowe stanowią podstawowe wyposażenie filtrów o działaniu dwukierunkowym przeznaczonych do oczyszczania przepływającego płynu. Schemat działania takiego filtra, przedstawiony na rys. 3.98, pokazuje położenie wkładu filtracyjnego i zaworów w dwu fazach pracy a) i b), odpowiadających dwu różnym kierunkom przepływu.

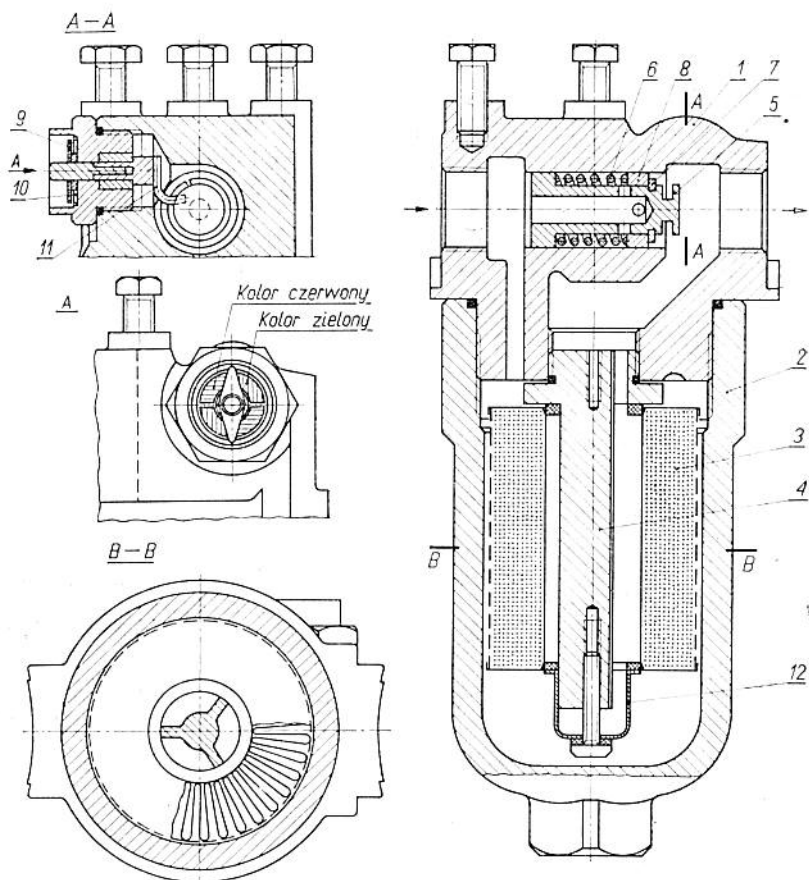
Niektóre konstrukcje filtrów są wyposażone oprócz zaworów przelewowych, również w sygnalizatory ich otwarcia. Konstrukcję filtra wysokociśnieniowego *Fairey* (921A-2RB-135) zawierającą zawór przelewowy połączony z sygnalizatorem otwarcia przedstawio-



Rys. 3.98. Schemat filtra dwukierunkowego przepływu; 1 — osłona filtra, 2 — wkład filtracyjny, 3 — kierunek przepływu płynu

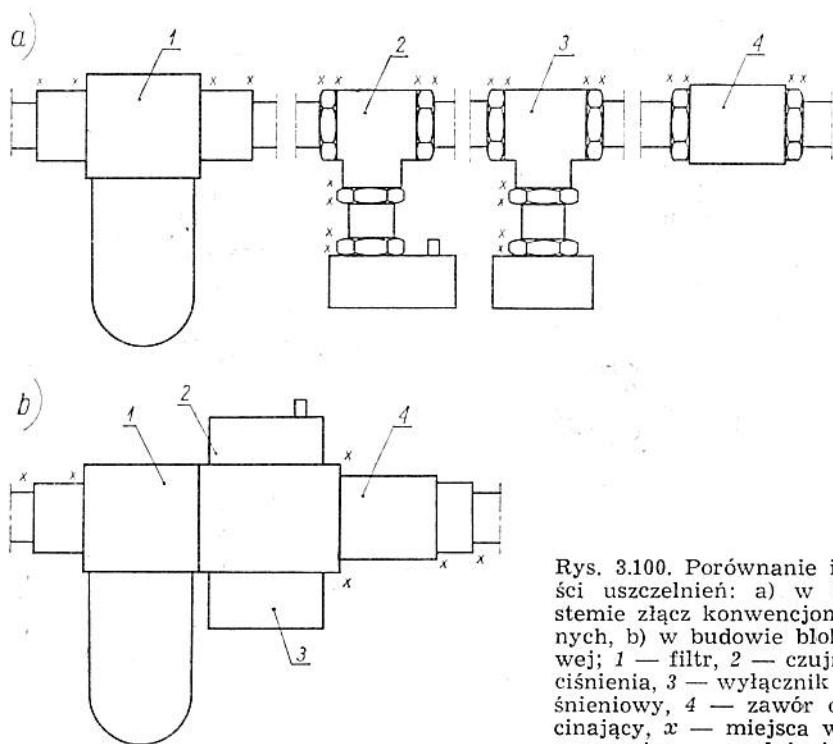
no na rys. 3.99. Należy tutaj podkreślić, że sygnalizowany stan otwarcia zaworu przelewowego jest równocześnie miarą stanu zanieczyszczenia wkładu filtracyjnego lub niekiedy też miarą wzrostu lepkości płynu.

Odrębnym zagadnieniem konstrukcyjnym jest szczelność instalacji wysokociśnieniowej i związane z tym użycie złączy wymagających uszczelnienia. Budowa filtrów w większości przypadków jest taka, że umożliwia łączenie przewodowe, a więc użycie złączy typu konwencjonalnego. W przypadku bardziej rozbudowanej instalacji płynowej, wyposażonej również w urządzenia pomiarowo-



Rys. 3.99. Budowa filtra wysokociśnieniowego wyposażonego w zawór przelewowy i sygnalizator otwarcia; 1 — kadłub, 2 — obudowa, 3 — papierowy wkład filtracyjny, 4 — trzpień zamocowania wkładu, 5 — tłok zaworu, 6 — sprężyna, 7 — pierścień, 8 — tuleja ograniczająca, 9 — wskazówka, 10 — tarcza wskazówki, 11 — popychacz, 12 — pokrywa dociskowa wkładu

-kontrolne, jest konieczne zabezpieczenie szczelności w nadmiernej liczbie punktów łączenia ze względu na zastosowanie przewodów i rozgałęzień. W przykładzie przedstawionym na rys. 3.100 przy połączeniu przewodowym czterech elementów instalacji jest wymagane zagwarantowanie szczelności w 24 punktach. Przez wykonanie tych elementów w systemie blokowym połączonych z filtrem zmniejsza się liczbę punktów wymagających uszczelnienia —



Rys. 3.100. Porównanie ilości uszczelnień: a) w systemie złączy konwencjonalnych, b) w budowie blokowej; 1 — filtr, 2 — czujnik ciśnienia, 3 — wyłącznik ciśnieniowy, 4 — zawór odcinający, x — miejsca wymagające uszczelnienia

do sześciu. Tak więc przewaga systemu blokowego jest oczywista, chociaż niekiedy czyni urządzenie pływne bardziej specjalizowanym.

3.9. Sygnalizatory stanu zanieczyszczenia wkładu filtracyjnego

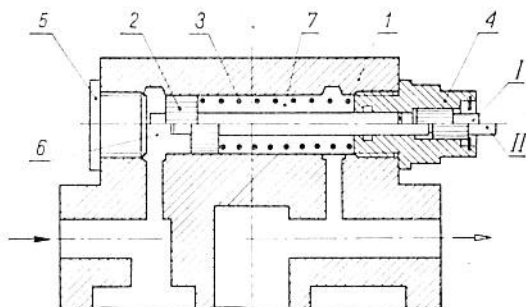
Sygnalizatory stanu zanieczyszczenia wkładu filtracyjnego służą do wskazywania granicznego, umownego wzrostu różnicy ciśnień powstałej w wyniku ciągłego procesu zanieczyszczania się wkładu filtracyjnego. W najprostszym rozwiązaniu jest możliwe zastosowanie dwu manometrów przed i za filtrem lub zewnętrznego manometru różnicowego. Naturalnie, zakresy ciśnień nominalnych w układzie i różne spadki ciśnienia stanowią zasadniczą trudność w instalowaniu typowych przyrządów pomiarowych ciśnienia.

Trudność taką pogłębia fakt, że spadki ciśnień na elemencie filtracyjnym są niewielkie, i w związku z tym jest konieczne stosowanie przyrządów pomiarowych wysokiej klasy ze względu na duże na ogół ciśnienia nominalne. Dodatkowym utrudnieniem w sprawnym użytkowaniu standardowych przyrządów jest ich działanie analogowe, co zmusza do ciągłego śledzenia aktualnych różnic ciśnień. Ponadto przyrządy standardowe są nieporęczne, mają duże wymiary, oraz często wskaźniki cyfrowe są nieprzystosowane do szybkiego odczytywania ciśnień w warunkach eksploatacyjnych. Względy te spowodowały konieczność zajęcia się budową urządzeń specjalizowanych, które stanowią konstrukcyjną całość z filtrem płynu roboczego. Cechą charakterystyczną niemal wszystkich konstrukcji sygnalizatorów stanu zanieczyszczenia wkładów filtracyjnych jest to, że sygnalizują one czy wkład filtracyjny jest sprawny (w sensie dopuszczalnego spadku ciśnienia), czy jest zanieczyszczony w stopniu wskazującym na konieczność jego wymiany oraz, czy przekroczony został graniczny spadek ciśnienia i jeśli filtr jest wyposażony w zawór przelewowy — następuje bocznikowanie przepływu płynu.

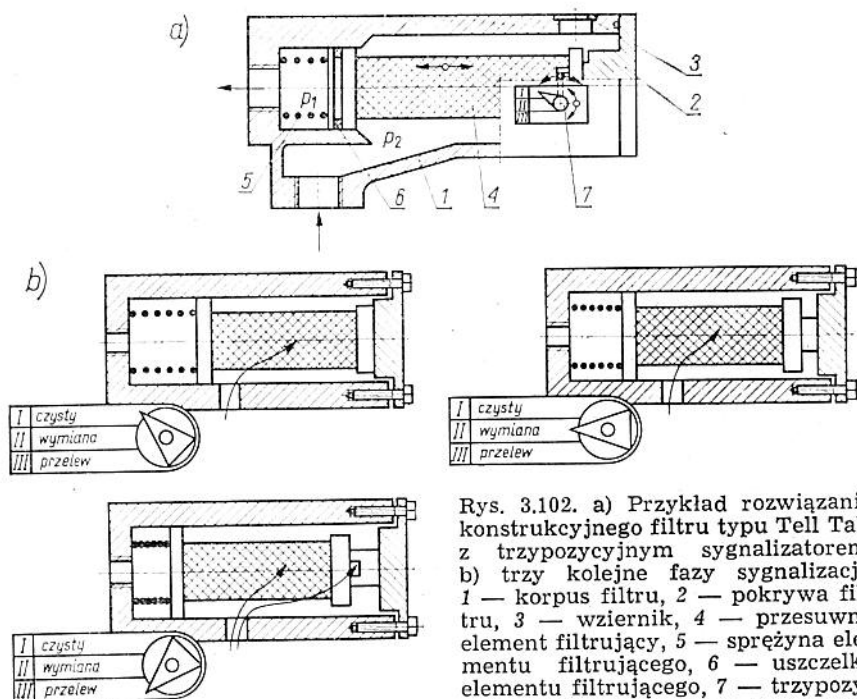
Sygnalizatory stanu zanieczyszczenia stosuje się szczególnie w filtrach dokładnego i bardzo dokładnego oczyszczania ze względu na ich wyjątkową wrażliwość na zanieczyszczenia płynów roboczych i szybką utratę zdolności przepuszczania płynu w przypadku zanieczyszczenia wkładu filtracyjnego. Możliwe jest również stosowanie sygnalizatorów w filtrach średniodokładnych i zgrubnego oczyszczania, ale ich przydatność w tym przypadku ogranicza fakt, że np. zbocznikowanie wkładu zaworem przelewowym wywołuje tylko nieznacznie gorszy efekt w porównaniu z przepływem płynu przez taki filtr. Największe rozpowszechnienie znalazły sygnalizatory stanu zanieczyszczenia w filtrach dokładnego oczyszczania, w filtrach ssawnych oraz w filtrach wyposażonych we wkłady z materiału o małej wytrzymałości mechanicznej. W filtrach, w których wkłady filtracyjne mają albo dużą wytrzymałość, albo w których zbocznikowanie przepływu jest niedopuszczalne, nie jest zalecane stosowanie zaworów przelewowych, a dwa lub trzy zakresy sygnalizacji umożliwiają w porę wymianę lub regenerację wkładu filtracyjnego.

Jak wspomniano wcześniej, sygnalizatory są specjalizowanymi konstrukcjami dwu- lub trzyczakresowych manometrów różnicowych. Najczęściej są one wykonywane w postaci tłoków różnicowych wyposażonych w sprężynę zwrotną do cofania tłoka lub nastawienia żądanej różnicy ciśnień. Przykład konstrukcji prostego sygnalizatora stanu zanieczyszczenia pokazano na rys. 3.101 który wskazuje dwie pozycje określające: *I* — wkład czysty, *II* — wkład do wymiany. Przez oddzielenie tłoka różnicowego 2 umie-

szczonego w kadłubie 1 i podpartego sprężyną 3, od tłoka wskazującego pozycje I i II umieszczonego w nakrętce 4 jest możliwe stwierdzenie stanu zanieczyszczenia wkładu niezależnie od tego czy istnieje przepływ przez filtr, czy też nie, jak również i przybraku ciśnienia w instalacji. Zmiana pozycji I na II pokazana na



Rys. 3.101. Konstrukcja prostego sygnalizatora stanu zanieczyszczenia wkładu filtracyjnego



Rys. 3.102. a) Przykład rozwiązania konstrukcyjnego filtra typu Tell Tale z trzypozycyjnym sygnalizatorem, b) trzy kolejne fazy sygnalizacji; 1 — korpus filtra, 2 — pokrywa filtra, 3 — wzniesienie, 4 — przesuwany element filtrujący, 5 — sprężyna elementu filtrującego, 6 — uszczelka elementu filtrującego, 7 — trzypozycyjny sygnalizator stanu zanieczyszczenia elementu filtrującego

rysunku następuje w przypadku, gdy ciśnienie w komorze 6 (przed wkładem filtracyjnym) przewyższy ciśnienie w komorze 7 (za wkładem). Korek 5 spełnia rolę elementu montażowego tłoka różnicowego 2 oraz w miarę potrzeby umożliwia wymianę sprężyny 3. Przedstawione rozwiązanie konstrukcyjne sygnalizatora ma tę wadę, że reaguje nawet na chwilowe przekroczenie nominalnego natężenia przepływu, na uderzenie ciśnienia oraz na zwiększoną lepkość płynu. Zaletą tego rozwiązania jest jednak fakt, że przypawkowe zajęcie pozycji *II* może być łatwo stwierdzone, gdy w nominalnych warunkach pracy jest możliwe ręczne wciśnięcie tłoka wskazującego.

Schemat konstrukcyjny i działanie filtra, w którym wkład filtracyjny przesuwa się w miarę wzrostu różnicy ciśnień pokazano na rys. 3.102. Ruch wkładu powoduje zmianę pozycji wskaźki trzypozycyjnego sygnalizatora stanu zanieczyszczenia 7 w ten sposób, że:

— w pozycji *I* wkład filtracyjny jest czysty — występuje pełny przepływ cieczy przez element filtracyjny;

— w pozycji *II* wkład filtracyjny wymaga oczyszczenia — w związku z zanieczyszczeniem zwiększa się spadek ciśnienia na wkładzie; pod wpływem różnicy ciśnień wkład przesuwa się, a jego ruch jest przekazywany na wskaźnik, który zajmuje odpowiednią pozycję; w dalszym ciągu występuje pełny przepływ cieczy przez element filtracyjny;

— w pozycji *III* następuje przelew — różnica ciśnień jest tak duża, że otwarty został zawór przelewowy i zachodzi częściowo filtrowanie.

Podobną konstrukcję, lecz w innym układzie usytuowania elementu sygnalizacji, przedstawiono na rys. 3.103. Wskaźówka wodząca o półkolistym kształcie ustawia się w pozycji odpowiadającej stanowi zanieczyszczeń wkładu napisanemu słownie na górnej czaszy pokrywy filtra i umożliwia obserwację tego stanu nawet ze znacznej odległości.

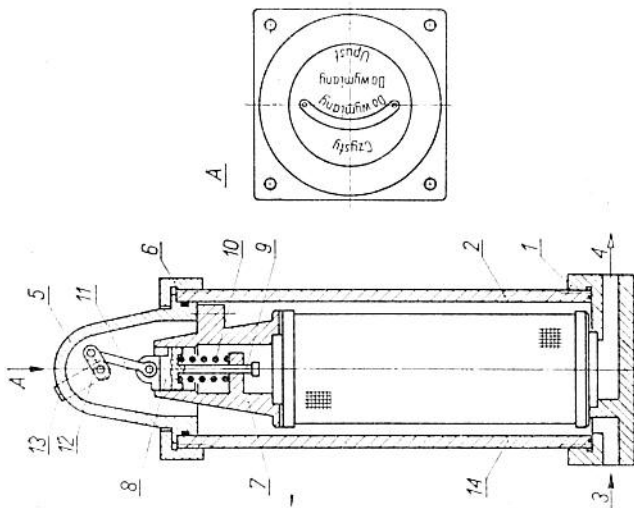
Zastosowanie sygnalizatora stanu zanieczyszczenia ze zmianą barw pokazano na rys. 3.104. Kolejne pozycje tarczy sygnalizującej wskazują:

Z — pasmo koloru zielonego — filtr czysty; do układu płynie czysty olej;

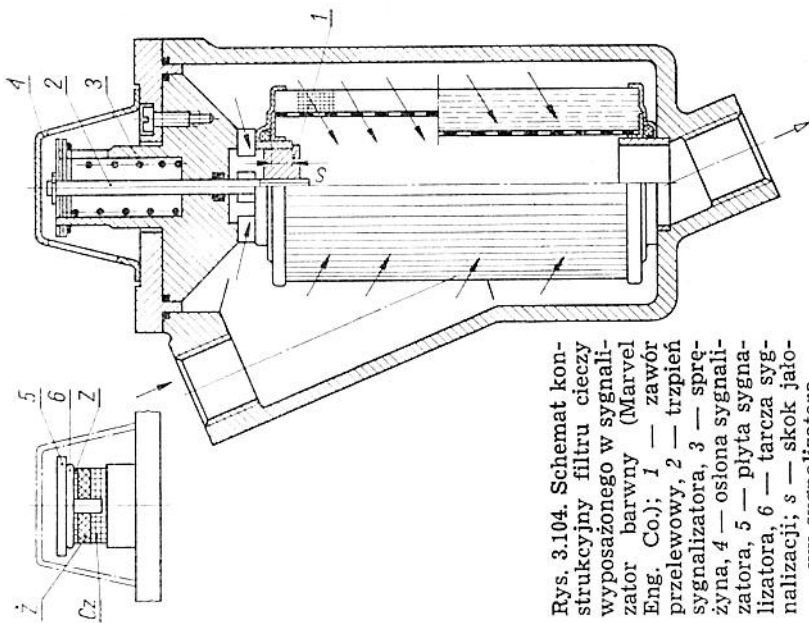
Ż — pasmo koloru żółtego — filtr zanieczyszczony, do układu płynie czysty olej (należy oczyścić element filtracyjny);

Cz — pasmo koloru czerwonego — filtr zanieczyszczony, do układu przez otwarty zawór przelewowy płynie olej zanieczyszczony.

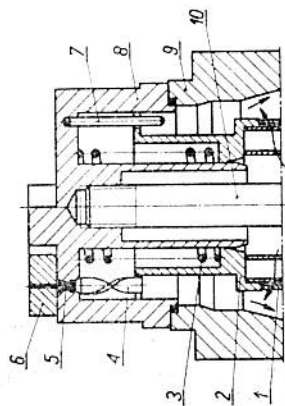
Trzy schematy konstrukcyjne przedstawione na rys. 3.105 do 3.107 pokazują dalsze przykłady rozwiązań konstrukcyjnych syg-



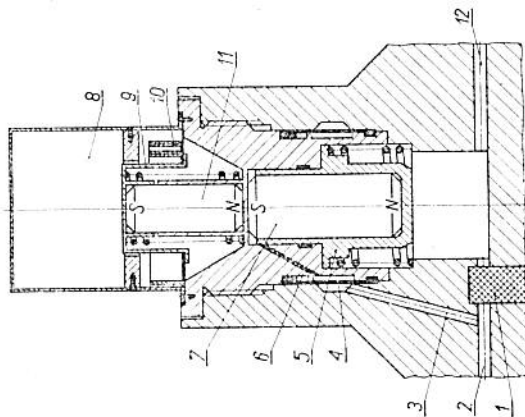
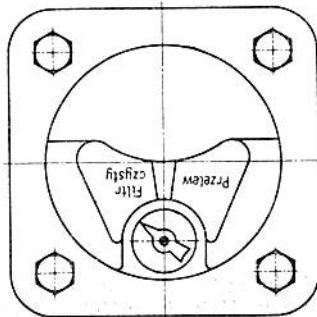
Rys. 3.103. Filtr z półkolistą wskazówką sygnalizatora stanu zanieczyszczenia (Cuno Div., American Machine and Foundry Co.); 1 — podstawa filtru, 2 — obudowa wkładu, 3, 4 — wlot i wylot płynu, 5 — pokrywa, 6 — nakrętka, 7 — obsada, 8 — tłok, 9 — trzpień prowadzący, 10 — sprężyna, 11 — łącznik, 12 — ramie dźwigni, 13 — wskazówka, 14 — wkład filtracyjny



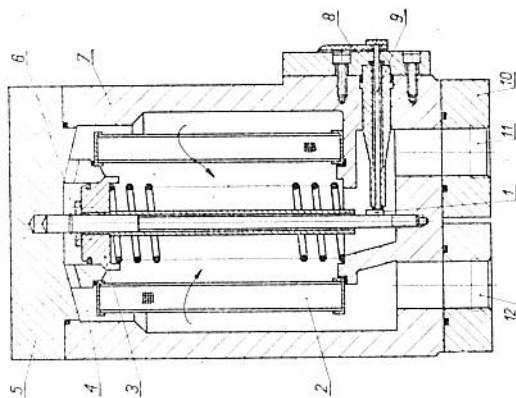
Rys. 3.104. Schemat konstrukcyjny filtru cieczy wyposażonego w sygnalizator barwny (Marvel Eng. Co.); 1 — zawór przelewowy, 2 — trzpień sygnalizatora, 3 — sprężyna, 4 — osłona sygnalizatora, 5 — płyta sygnalizatora, 6 — tarcza sygnalizacji; s — skok jałowy sygnalizatora



Rys. 3.105. Sygnalizator stanu zanieczyszczenia wkładu (Marvel Eng Co); 1 — wkład filtracyjny, 2 — obsada, 3 — sprężyna, 4 — element śrubowy, 5 — trzpień, 6 — obsada wskazówki, 7 — bolec, 8 — osłona, 9 — kadłub filtru, 10 — śruba łącząca

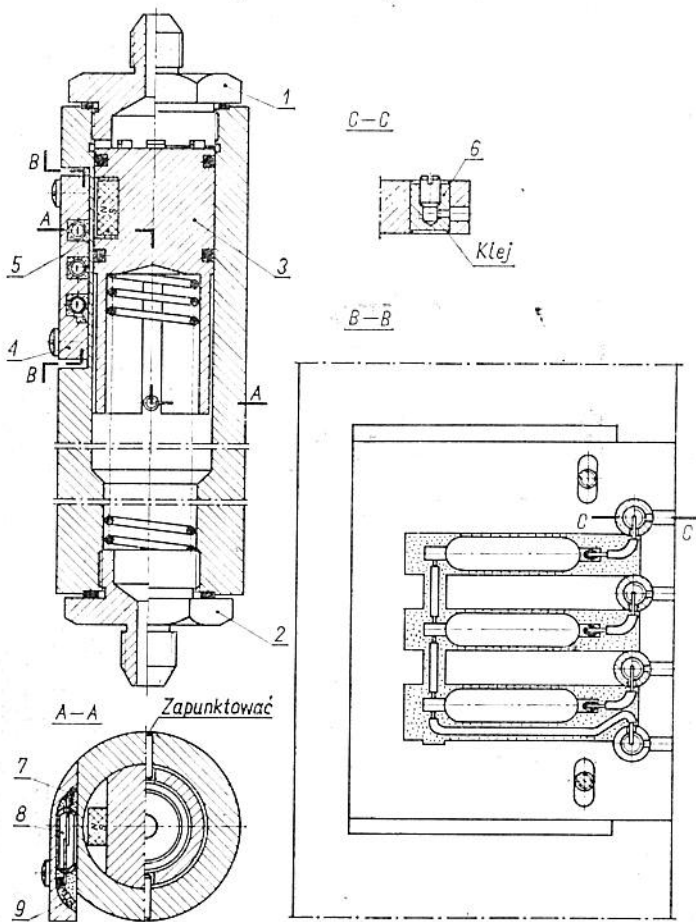


Rys. 3.106. Sygnalizator stanu zanieczyszczenia wkładu (Pall Corp); 1 — wkład filtracyjny, 2 — dopływ płynu, 3 — kanał do sygnalizatora, 4 — filtr, 5 — tłok, 6 — przewód ciśnienia wejściowego, 7, 11 — magnesy stałe, 8 — przekaźnik elektryczny, 9 — kołpak, 10 — element bimetaliczny, 12 — kanał odpływu płynu



Rys. 3.107. Sygnalizator stanu zanieczyszczenia wkładu (Rosaeen Filter Comp); 1 — ramię krzywki, 2 — wkład filtracyjny, 3 — zawór, 4 — komora ciśnienia wejściowego, 5 — pokrywa, 6 — komora ciśnienia wejściowego, 7 — osłona, 8 — wskazówka, 9 — bolec napędowy, 10 — złącze filtru, 11 — kanał wypływu płynu, 12 — kanał dopływu płynu

nalizatorów stanu zanieczyszczenia. Konstrukcja sygnalizatora z rys. 3.105 charakteryzuje się zastosowaniem elementu śrubowego 4 łączącego ruch obsady 2 wkładu filtracyjnego 1 poprzez trzpień 5 z obsadą wskazówki 6 sygnalizatora. Sygnalizator przedstawiony na rys. 3.106 jest wyposażony w dwa magnesy stałe oraz element bimetaliczny uniezależniający wskazania od zmian lepkości płynu. W konstrukcji sygnalizatora wg rys. 3.107 przenoszenie ruchu od tłoka różnicy ciśnień do wskazówki odbywa się przez zastosowanie elementu krzywoliniowego.



Rys. 3.108. Konstrukcja autonomicznego sygnalizatora różnicy ciśnień filtru; 1, 2 — złącza na wejściu i wyjściu filtru, 3 — suwak, 4 — pokrywa osadca zestyków, 5 — magnes stały, 6 — tuleja, 7 — masa izolacyjna, 8 — zestyk hermetyczny, 9 — przewód elektryczny

Inne rozwiązania konstrukcyjne zawierają w sobie różne zasady przekazywania zmieniającej się różnicy ciśnień na elemencie filtracyjnym. Zastosowanie przepon lub mieszków sprężystych stanowi odmianę konstrukcyjną działających na podobnych zasadach sygnalizatorów. Do bardziej interesujących należy zasada sygnalizacji z wykorzystaniem strumieniowych elementów logicznych (fluidics), w których strumień sterujący powstaje od bieżącej różnicy ciśnień na elemencie filtracyjnym.

W przypadku sygnalizatorów z wyjściem elektrycznym, interesujące rozwiązanie stanowi konstrukcja przedstawiona na rys. 3.108. Sygnalizator jest wyposażony w trzy zestyki hermetyczne oraz tłok podparty sprężyną z wbudowanym magnesem stałym. Sygnalizator w autonomicznym wykonaniu może być podłączony do filtru dowolnej konstrukcji, a wyjście elektryczne umożliwia wykorzystanie sygnałów stanu zanieczyszczenia wkładu filtracyjnego w dowolnej odległości od filtru.

3.10. Deaerolizatory cieczy roboczych

3.10.1. Rozpuszczalność gazów w cieczach

Jednym z najważniejszych urządzeń pomocniczych w hydraulicznych układach wysokociśnieniowych są urządzenia do odpowietrzania cieczy roboczych zwane *deaerolizatorami* lub *aspiratorami gazów*. Konieczność stosowania takich urządzeń, które najczęściej współpracują z filtrami, wynika z rozpuszczalności gazów w cieczach i szkodliwości tego zjawiska zwanej *efektem zapowietrzania* układu hydraulicznego.

Wszystkie ciecze charakteryzują się zdolnością rozpuszczania w sobie gazów; w rozpuszczonym stanie nie wykazują one dostrzegalnego oddziaływania mechanicznego na pracę układu hydraulicznego. Takie własności fizyczne, jak lepkość i gęstość, nieznacznie zmieniają się wskutek rozpuszczania powietrza w cieczy. W szczególności zmiana gęstości jest nieznaczna i można ją pominąć. Rozpuszczone powietrze także w małym stopniu wpływa na moduł sprężystości (ściśliwości) cieczy. W przypadku olejów mineralnych i ich mieszanin pozostaje on praktycznie stały przy zawartości powietrza odpowiadającej stanowi nasycenia pod ciśnieniem atmosferycznym.

Jeżeli obniży się ciśnienie, to przy pewnej jego wartości powietrze wydziela się z roztworu w postaci drobnych pęcherzyków, które pozostając w cieczy przez dłuższy okres czasu w stanie zawie-

szonym pogarszają własności mechaniczne cieczy i obniżają jej trwałość chemiczną. Dla porównania należy wyjaśnić, że w wodzie ten sam pęcherzyk wznosi się na powierzchnię 60 razy prędzej niż w oleju o średniej lepkości.

Z obliczeń wynika, że jeżeli średnicę pęcherzyka zmniejszy się dwukrotnie, wówczas czas potrzebny na wydostanie się jego na powierzchnię, pomijając napięcie powierzchniowe, zwiększy się czterokrotnie. Drobne pęcherzyki mogą pozostawać w oleju w postaci mieszaniny przez kilka dni, zaś wydzielające się w cieczy powietrze zbiera się nad jej powierzchnią w zbiorniku. Zatem w układzie hydraulicznym powietrze może być rozpuszczone w cieczy, może być w niej zawarte w postaci pęcherzyków, może także występować nad powierzchnią cieczy jako „gaz wolny”.

Ilość gazu jaka może rozpuścić się w cieczy do stanu nasycenia jest wprost proporcjonalna do ciśnienia na granicy ośrodków (*prawo Henry'ego*). *Objętość powietrza rozpuszczonego w cieczy*

$$V_p = k V_d p_a$$

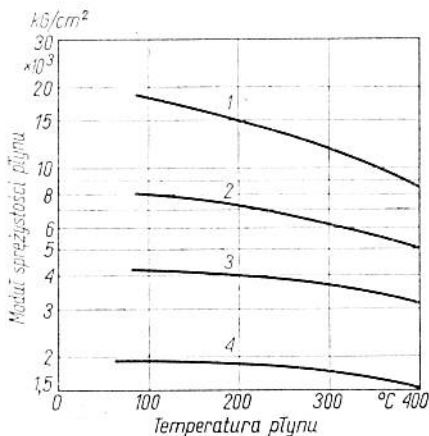
gdzie: V_p — objętość powietrza rozpuszczonego w cieczy odniesiona do ciśnienia 760 mm Hg i temperatury 0°C wyrażona w cm^3 , k — współczynnik rozpuszczalności powietrza w cieczy, V_d — objętość oleju w cm^3 , p_a — ciśnienie absolutne gazu stykającego się z cieczą w kG/cm^2 .

Współczynnik rozpuszczalności powietrza w cieczy k zależy zarówno od własności cieczy jak i gazu. Nierozpuszczone powietrze w cieczy wpływa niekorzystnie nie tylko na pracę pompy, ale również na pracę całego układu hydraulicznego, co jest spowodowane wzrostem prężności cieczy, której wielkość (niezależnie od wielkości pęcherzyków powietrza) będzie tym większa im większa będzie całkowita objętość pęcherzyków. Zwiększenie prężności cieczy powoduje spadek sztywności statycznej i dynamicznej układu hydraulicznego. Zapowietrzenie układu hydraulicznego oddziałuje niekorzystnie zarówno na składniki, jak i na działanie całego układu. Najbardziej widocznymi objawami zapowietrzenia są: drgania układu, strata mocy, zmniejszenie modułu sprężystości objętościowej cieczy, zwiększenie temperatury cieczy, opóźnienie odpowiedzi na wymuszenie, spienienie cieczy, „gąbczaste” sterowanie oraz kawitacja.

Ciecze są mało ściśliwe i dlatego układy hydrauliczne powinny cechować się dużą sztywnością w celu natychmiastowego i dokładnego ustawienia ruchomego członu wykonawczego. Jeżeli do układu dostanie się powietrze, ruch roboczy członu wykonawczego będzie wolniejszy i jego pozycja mniej dokładna. Większa ilość powietrza czyni zatem układ „miękkim”. Powietrze znajdujące się w układzie będzie sprężane i rozprężane odpowiednio do zmian ciśnienia.

Zmniejszenie ciśnienia będzie powodowało rozprężanie powietrza, wzrost ciśnienia zużyty będzie w pierwszej kolejności na sprężanie powietrza. Opóźnienie odpowiedzi na wymuszenie i „gąbczaste” sterowanie, brak dokładności i strata mocy mogą być wyrażone ilościowo zmniejszeniem modułu sprężystości objętościowej oleju.

Zależność między modulem sprężystości objętościowej a temperaturą i zawartością powietrza w postaci pęcherzyków przedstawiają wykresy z rys. 3.109. W pewnych warunkach obecność powietrza w oleju może doprowadzić do powstania piany (emulgo-



Rys. 3.109. Przykładowe zależności zmiany modułu sprężystości oleju i temperatury przy różnych zawartościach powietrza w postaci pęcherzyków; 1 — olej bez powietrza, 2 — olej z zawartością 1% powietrza, 3 — 5% powietrza, 4 — 10% powietrza

wanie oleju). Spienienie zazwyczaj występuje w zbiorniku. Obecność piany w układzie powoduje obniżenie się własności smarujących, utlenianie się oleju oraz sprzyja korozji części metalowych zespołów hydraulicznych. Piana powstaje tym intensywniej im niższe jest napięcie powierzchniowe i ciśnienie (sprężystość) pary nasyconej cieczy. Warunki takie powstają przy przedostaniu się do cieczy w układzie hydraulicznym niewielkiej ilości (poniżej 0,1% wagowo) wody.

Tworzenie się i trwałość piany w znacznym stopniu zależy od temperatury, przy czym trwałość piany ze wzrostem temperatury maleje. Przy temperaturze powyżej $70^{\circ}C$ odbywa się zwykle szybki rozpad piany. Jedną z przyczyn sprzyjających pienieniu się oleju może być jego zmydlenie wskutek chemicznego oddziaływania

z pewnymi metalami lub pokryciami. Do takich pokryć należy po-
bielanie, które często stosuje się w zbiornikach układów hydrau-
licznych. Szczególną skłonnością do tworzenia trwałej piany wy-
różniają się ciecz silikonowe. Powietrze, które wydziela się z tej
cieczy w obszarach obniżonego ciśnienia lub przedostające się z ze-
wnątrz tworzy z tą cieczą nadzwyczaj trwałą mieszaninę.

Jednym z bardzo groźnych objawów zapowietrzenia układu
jest kawitacja. Powstaje ona wskutek lokalnego spadku ciśnienia
w cieczy (np. za szybko poruszającym się ciałem). Kawitacja na
powierzchni opływanych ciał powoduje ich gwałtowne mechanicz-
ne niszczenie. Na powierzchni elementów powstają nierówności
i wżery.

Główną przyczyną przedostawania się powietrza do układu
hydraulicznego są nieszczelności w miejscach, w których ciśnienie
spada poniżej atmosferycznego, a przede wszystkim nieszczelności
części ssawnej pompy. Oprócz tego rozpuszczone powietrze wydzie-
la się z cieczy w miejscach o obniżonym ciśnieniu. W szczególności
pęcherzyki powietrza wydzielają się z oleju przy przejściu
przez opory miejscowe, w których zwiększenie prędkości przepły-
wu cieczy powoduje obniżenie ciśnienia. Oddzielenie powietrza
znajdującego się w mieszaninie z cieczą przedstawia duże trudno-
ści, wskutek czego należy przede wszystkim zmniejszyć możliwość
przedostawania się go do układu.

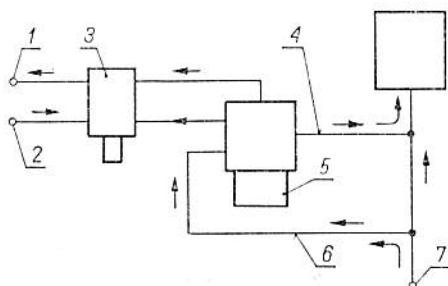
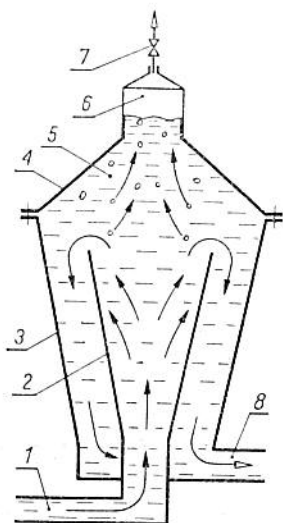
Należy podkreślić, że całkowite usunięcie nierozpuszczonego
powietrza z działającego układu hydraulicznego jest niemożliwe.
Potwierdza się to tym bardziej, że ściśliwość oleju w działającym
układzie hydraulicznym jest zwykle mniejsza niż ściśliwość oleju
znajdującego się w magazynie. Pomiary wykazują, że olej z dowol-
nie działającego układu hydraulicznego zawiera co najmniej $0,2 \div$
 $0,3\%$ nierozpuszczonego powietrza, a normalnie zawartość powie-
trza wynosi $10 \div 20\%$, albo też powyżej tych wartości.

3.10.2. Urządzenia do usuwania gazów z cieczy roboczych

Rozwój urządzeń odpowietrzających ciecz robocze jest zwią-
zany głównie z układami hydraulicznymi samolotów. Przy roz-
wiązywaniu problemów związanych z zapewnieniem bezpieczeń-
stwa lądowania zajęto się poważnie konstrukcją urządzeń okreso-
wego i ciągłego usuwania gazów zawartych w cieczach amortyza-
torów pneumohydraulicznych, z bezpośrednim kontaktem powie-
trza lub azotu z cieczą, oraz w układach hydraulicznych podwozia.
Typowe objawy zapowietrzenia układu hydraulicznego są związa-
ne z chybotaniem przedniego koła powodującym niebezpieczne

drżania kadłuba samolotu. Również w zagadnieniach sterowania elektrohydraulicznego problem drgań układu wiąże się w wielu przypadkach z zapowietrzeniem instalacji wysokociśnieniowej. Układy deaerolizatorów zwiększających efektywność tłumienia obciążenia działają na różnych zasadach. Jedną z najprostszych konstrukcji polega na zastosowaniu „lejka” komorowego, w którym następuje zmiana prędkości i kierunku przepływu cieczy (rys. 3.110).

Konstrukcje bardziej efektywne polegają na wykorzystaniu spadku ciśnienia na wlocie do komory zawierającej małą ilość cieczy, systematycznie odprowadzanej z ciśnieniowej instalacji hydraulicznej obwodu narażonego na drżania. Wydzielony gaz jest odprowadzany w sposób uniemożliwiający jego powrót do układu podczas przerwy w pracy urządzenia hydraulicznego (rys. 3.111).



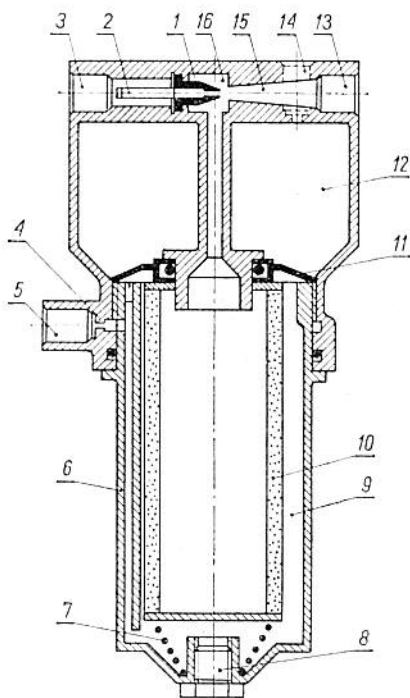
Rys. 3.111. Schemat obiegu cieczy separatora odpowietrzającego; 1 — przewód powietrza usuwanego z cieczy, 2 — przewód cieczy do pompy strumieniowej w układzie wysokociśnieniowym, 3 — zawór upustowy, 4 — przewód cieczy odpowietrzonej o niskim ciśnieniu, 5 — separator odpowietrzający ciecz, 6 — przewód obejściowy separatora, 7 — przewód powrotu zapowietrzonej cieczy o niskim ciśnieniu

Rys. 3.110. Separator gazu z oleju; 1 — przewód wejściowy, 2 — lejek, 3 — osłona separatora, 4 — pokrywa, 5 — komora przejściowa, 6 — zbiornik gazu, 7 — zawór usuwania gazu, 8 — przewód wyjściowy

Skuteczne usuwanie powietrza może być realizowane przez użycie siatki filtrującej 10 μm , jako bariery zatrzymującej pęcherzyki powietrza. Spadek ciśnienia przepływającego płynu zapewniający skuteczność działania wynosi ok. 230 mm H_2O . Wykorzystanie siatki jest możliwe tylko w przypadkach, gdy znajdujący się

w cieczy gaz występuje w postaci pęcherzyków, czyli wtedy gdy zawartość gazu przekracza granicę punktu nasycenia. Ponadto wzrost ciśnienia w układzie prowadzi do zmniejszenia się wymiarów pęcherzyków. Już ciśnienie 2–3 kG/cm² może doprowadzić do takiego sprężenia powietrza, że pęcherzyki przejdą przez filtr siatkowy. Wynika stąd, że najprostszym sposobem oddzielania gazu od cieczy jest zastosowanie pompy strumieniowej do obniżenia ciśnienia w komorze. Jest to sposób umożliwiający wyzwolenie dużej ilości rozpuszczonego w cieczy gazu oraz wolnego powietrza, a następnie oddzielenie gazu od cieczy za pomocą przegrody siatkowej.

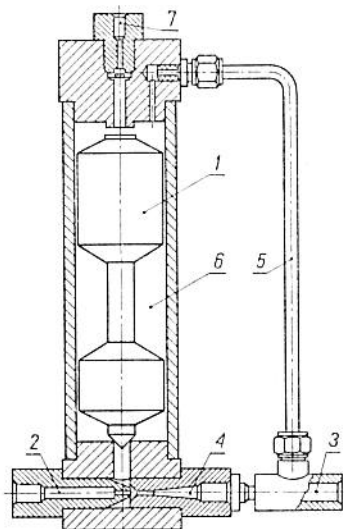
Zastosowanie lejków komorowych, przegród siatkowych i podciśnienia przy napełnianiu układu hydraulicznego w znacznym stopniu zapewnia zmniejszenie się wydzielania powietrza w czasie pracy układu. Dodatkowym warunkiem, jaki powinien być speł-



Rys. 3.112. Deaerolizator z przegrodą filtracyjną (Lockheed); 1 — dysza zbieżna, 2 — filtr zabezpieczający dyszę cieczy wysokiego ciśnienia, 3 — wlot cieczy wysokiego ciśnienia, 4 — opór, 5 — wlot cieczy zapowietrzonej o niezbyt wysokim ciśnieniu, 6 — osłona, 7 — sprężyna, 8 — korek spustowy, 9 — komora wydobywania się powietrza, 10 — element filtracyjny, 11 — przegroda gumowa, 12 — zbiornik powietrza, 13 — wpływ cieczy odpowietrzonej, 14 — otwór upustu powietrza, 15 — dysza rozbieżna, 16 — komora ciśnienia zredukowanego

niony przy napełnianiu urządzenia hydraulicznego, jest użycie cieczy już odpowietrzonej wstępnie. W celu dokładniejszego odpowietrzenia, ciecz powinna przejść jeszcze przez deaerolizator.

Przykład konstrukcji deaerolizatora przedstawiono na rys. 3.112. Ciecz z układu hydraulicznego wysokiego ciśnienia jest doprowadzana do separatora otworem 3. Przepływając przez dyszę 1, zabezpieczoną filtrem 2, tworzy w komorze 16 obszar niskiego ciś-



Rys. 3.113. Automatyczny deaerolizator okresowego działania (Seaton Wilson Mfg. Co); 1 — pływak, 2 — dysza strumieniowa zbieżna, 3 — odpowietrzona ciecz o niskim ciśnieniu, 4 — dysza rozbieżna, 5 — wypełniony cieczą przewód, 6 — komora deaerolizatora, 7 — upust do atmosfery

nienia. Zapowietrzona ciecz o niezbyt wysokim ciśnieniu jest podawana otworem 5 na filtr siatkowy 10 μm . Niskie ciśnienie wytworzone w komorze 16 umożliwia uformowanie się pęcherzyków i zasysanie płynu. Oddzielenie powietrza następuje na siatce drucianej 10 μm . Powietrze, które wydostało się z komory 9, przedostaje się następnie do komory 12, w której jest magazynowane. Z komory 9 do komory 12 powietrze przechodzi szczeliną, powstałą przez uniesienie przegrody 11. Odpowietrzona ciecz wypływa otworem 13. Ten separator powietrzno-olejowy z elementem filtrującym jest wykorzystywany w samolocie F-104.

Inne konstrukcje deaerolizatora powietrzno-olejowego mają aspirator umiejscowiony na dole, a nie na górze, jak opisany wyżej. Konstrukcje deaerolizatorów są dostosowane do przepływu, wielkości filtru i obsługi. Przepływ można nastawiać zaworem wlotowym. Automatyczny deaerolizator okresowego działania, pokazany na rys. 3.113, ma na celu okresowe usunięcie z cieczy rozpuszczonego w niej powietrza i zawartego w postaci pęcherzyków, a także „gazu wolnego”. W deaerolizatorze jest wmontowany zespół elementów, które służą do wytwarzania próżni w jego komorze. Składa się on z dyszy strumieniowej oraz dyszy de Lavalà

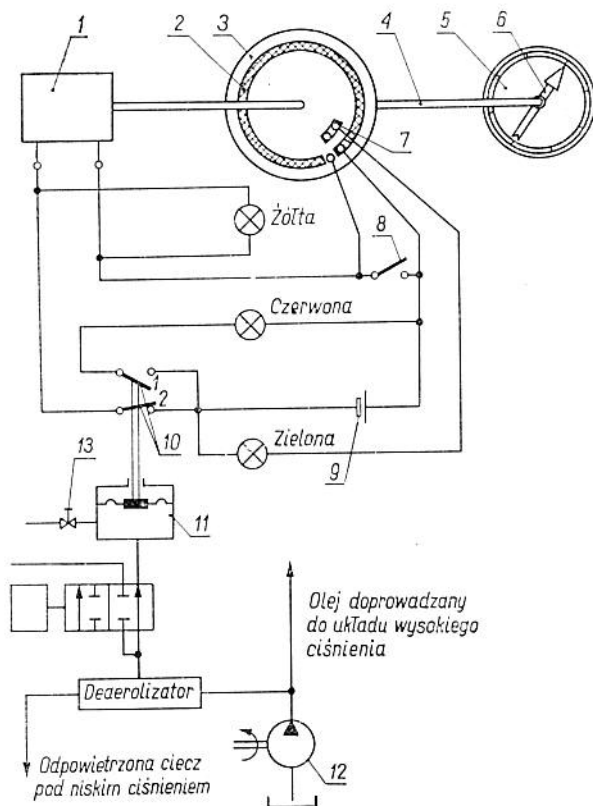
(z przewężeniem zbieżno-rozbieżnym). Jest to główna część deaerolizatora zwana *aspiratorem*. W warunkach próżni na skutek zmniejszonej rozpuszczalności gazu w cieczy, następuje jego wyzwalanie się z cieczy. Powietrze zbiera się w górnej części komory 6 deaerolizatora w czasie, gdy odpowietrzona ciecz wypływa otworem 3 i jest dostarczana z powrotem do układu hydraulicznego. W przypadku, gdy poziom cieczy w komorze 6 opadnie w związku z dużą ilością gazu, która zapełnia górną część komory, unoszony przez nią zawór także poruszy się ku dołowi i zamknie kanał łączący komorę 6 z komorą próżniową aspiratora. W ten sposób zostaje zatrzymany proces odpowietrzania. Pływakowy zawór szczelnie zamyka przewód łączący aspirator z główną komorą deaerolizatora, ponieważ wstępuje ssanie, które powoduje docisk grzybka zaworu do korpusu. Olej zaczyna przepływać linią 5 zapełniając komorę główną, wypychając zarazem z niej powietrze przez zawór 7, którym gaz uchodzi do atmosfery. Jeżeli ciecz dostatecznie zapełni komorę 6, wówczas siła wyporu pływaka przewyższy siłę ssania, z którą zawór pływakowy jest dociskany do korpusu aspiratora i uniesie go do góry. W ten sposób komora główna 1 i komora próżniowa deaerolizatora będą połączone, a zamknięty zostanie przewód, którym wyzwolone powietrze uchodzi do atmosfery. Następnie cykl powtarza się.

Na rys. 3.114 przedstawiono schemat sygnalizacji deaerolizatora. Układ ten umożliwi sprawdzenie stopnia zapowietrzenia cieczy i określenie czy nadaje się ona do pracy w układzie hydraulicznym. Układ jest połączony bezpośrednio z otworem deaerolizatora, przez który jest usuwane wydzielone z cieczy powietrze. Przystępując do uruchomienia sygnalizacji najpierw nastawiamy zawór 13 kaskady w siłowniku przeponowym 11 na odpowiednią wartość sygnalizowanego ciśnienia. Układ włączamy stykiem 8 (normalnie otwartym) przyciskając go palcem. Układ zaczyna działać, zapala się żółta żarówka. Styk 8 musi pozostawać zamknięty do chwili, gdy bieznik 2 na tarczy 3 wjedzie pod odpowiednią parę styków i zewrze je. Wtedy można wyłączyć styk 8. Żółta żarówka pali się nadal, co oznacza, że układ pracuje. Silnik obraca przekładnię zmniejszającą, której przełożenie można odpowiednio dobrać, tzn. można nastawić czas jednego pełnego obrotu wału 4. Założmy, że jeden pełny obrót wału trwa 10 minut. Na tle nieruchomej tarczy 5 obraca się wskazówka 6. W tym czasie w komorze kaskadowej 11 ustala się wartość ciśnienia odpowiadająca intensywności wydobywania się powietrza z deaerolizatora.

Jeżeli w ciągu zadanego czasu, tzn. jednego pełnego cyklu, gazy w komorze nie osiągną określonego ciśnienia, to wiadomo że w cieczy znajduje się niewiele gazu i że można jej używać. Po

upływie godziny układ wyłącza się samoczynnie, ponieważ jeden ze styków spada z bieżni 2 i jest przerwa w obwodzie. Jednocześnie bieżnia 7 wjeżdża pod drugą parę styków zwierając je, a więc zapalając żarówkę zieloną. Zapalenie się zielonej żarówki oznacza, że zawartość powietrza w cieczy nie przekroczyła granicznej wartości, przy której ciecz nie nadaje się już do użycia bez uprzedniego odpowietrzenia.

Jeżeli granica ta została przekroczona przed upływem ustalonego czasu (10 minut), wówczas oznacza to, że ciśnienie w komorze 11 siłownika (komorze kaskadowej) osiągnęło ustaloną wartość,



Rys. 3.114. Układ sygnalizacji deaerolizatora; 1 — silnik z reduktorem, 2 — bieżnia styków, 3 — tarcza z bieżniami, 4 — wał napędu tarczy i wskazówki, 5 — tarcza skali, 6 — wskazówka, 7 — bieżnia styków, 2, 8 — styk uruchomienia układu, 9 — źródło energii elektrycznej, 10 — styki siłownika przeponowego, 11 — komora kaskadowa, 12 — pompa, 13 — zawór upustowy kaskady

np. 100 mm H_2O , i następuje zadziałanie siłownika przeponowego. Wtedy styk 1 przełącznika zostaje zamknięty, a styk 2 — otwarty. Styk 1 zwierając się zapala żarówkę czerwoną, która sygnalizuje niedopuszczalne zapowietrzenie cieczy. Styk 2 rozwierając się wyłącza silnik, gaśnie żarówka żółta, wskazówka zatrzymuje się w pewnym niezerowym położeniu. Na skali można odczytać procent zapowietrzenia cieczy. Właściwie na skali odczytujemy czas, po którym układ wyłączył się, tzn. gazy wydobywające się z cieczy osiągnęły ciśnienie 100 mm H_2O . Prędkość wydobywania się gazów z cieczy jest miarą jej zapowietrzenia.

Rozdział 4. ANALIZA EFEKTYWNOŚCI FILTROWANIA

4.1. Analiza efektywności filtrowania mechanicznego

4.1.1. Uwagi ogólne

Cykl projektowania filtru płynu roboczego składa się z kilku etapów. Punktem wyjścia do projektowania jest przeznaczenie filtru, wynikające z jego umiejscowienia, i związane z tym warunki wpływające na wybór konstrukcji i obliczeń. Na ogół odróżnia się wyraźnie cykl projektowania filtrów gazu od cyklu projektowania filtrów cieczy. Oba jednak cykle projektowania mają wiele cech wspólnych. Zakładając, że warunki pracy filtru są dokładnie określone, należy dokonać wyboru zasady filtrowania, określić efektywność filtrowania w przyjętym układzie konstrukcyjnym, a następnie dokonać niezbędnych obliczeń lub badań umożliwiających wyznaczenie pozostałych cech budowy konstrukcyjnej filtru. Następne etapy są związane z obliczeniami wytrzymałościowymi wkładu i obudowy filtru, obliczeniami urządzeń pomocniczych i innymi obliczeniami wynikającymi ze specyfiki przyjętej konstrukcji. O ile większość etapów cyklu projektowania filtrów wiąże się z podstawową umiejętnością projektowania części maszyn w ogóle, o tyle analiza efektywności filtrowania jest zagadnieniem odmiennym. W związku z tym zagadnieniu temu poświęcono dużo miejsca zdając sobie jednak sprawę z tego, że przedstawiona tutaj analiza nie wyczerpuje całokształtu problematyki.

Ze względu na ogromną różnorodność zasad fizycznych działania filtrów przyjęto w rozważaniach analizy dwie podstawowe zasady filtrowania: mechanicznego i energetycznego, przy czym w pierwszym przypadku wybrano filtrowanie mechaniczne przez przegrodę porowatą, a w drugim — filtrowanie magnetyczne. Wybór ten jest uzasadniony największym zapotrzebowaniem na takie właśnie rozwiązania konstrukcyjne. Zagadnienia dotyczące filtrowania gazu przez przegrody filtracyjne przy bardzo małych ciśnieniach i prędkościach przepływu opisano w wielu pracach z tego zakresu i w związku z tym nie będą one tutaj omawiane. Należy

też brać pod uwagę fakt, że zagadnienia te podlegają ciągłym badaniom. W zakresie filtrowania płynodynamicznego istnieje również obszerna literatura. Opierając się na niej można w zasadzie wybrać dowolną metodę projektowania. Dotyczy to głównie projektowania filtrów odśrodkowych. Również filtry grawitacyjne nie sprawiają obecnie trudności projektowych.

W piwszej kolejności zajmujemy się filtrami mechanicznymi przy przyjęciu modelu filtrowania wymiarowego, który obejmuje w zasadzie wszystkie przypadki zastosowań przemysłowych filtrów płynów roboczych.

Przyjmijmy na początku, że przez *efektywność filtrowania płynów roboczych* będziemy rozumieć dowolny parametr lub zespół parametrów umożliwiających ocenę efektów włączenia filtru w układ płynowy, natomiast przez układ płynowy — układ wykorzystujący urządzenia gazowe, cieczowe i mieszane.

Przeprowadzimy z kolei rozważania w celu sprecyzowania kryteriów oceny efektywności filtrowania. Jest rzeczą oczywistą, że przeprowadzenie oceny efektywności filtrowania jest możliwe tylko wtedy, gdy dysponujemy dostateczną ilością informacji związanych z zadaniami układu i warunkami eksploatacyjnymi. Zakładając, że układ płynowy jest zaprojektowany poprawnie, możemy stwierdzić że na niesprawne jego działanie ma wpływ nieprawidłowy dobór filtru. Dlatego też poszukiwania przyczyn niesprawnego działania układu sprowadzają się głównie do analizy czystości płynów roboczych oraz własności filtru.

W rozważaniach ograniczymy się do rozpatrywania efektywności filtrowania przy użyciu filtrów mechanicznych. Postąpimy tak, ponieważ w większości nowoczesnych układów pneumatycznych i hydraulicznych są stosowane głównie filtry mechaniczne, a tylko nieliczne z nich są wyposażone dodatkowo w filtry energetyczne, najczęściej magnetyczne i płynodynamiczne. Tym nie mniej, zasadnicze określenia czystości płynów oraz klasyczne pojęcie charakterystyki lub współczynnika odfiltrowania filtrów mechanicznych dotyczą niemal wszystkich stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych filtrów płynów roboczych.

Ze znanych obecnie metod oceny efektywności filtrowania płynów roboczych, które mają istotne znaczenie w projektowaniu, wyróżniamy:

- metody oceny oparte na badaniach filtrów, a przede wszystkim wkładu filtracyjnego,
- metody oceny oparte na badaniach zanieczyszczeń w płynie, najczęściej przed i po przejściu przez filtr,
- metody oceny oparte na funkcjonowaniu członów lub całego układu płynowego,
- inne metody (np. modelowania procesu filtrowania).

Większość tych metod można zaliczyć do doświadczalno-analitycznych, w których eksperyment jest podstawą obliczeń efektywności filtrowania płynów roboczych głównie w przypadku filtrów porowatych oraz częściowo filtrów energetycznych.

Z kolei omówimy krótko niektóre kryteria oceny efektywności filtrowania i związane z tymi kryteriami metody badań, a następnie — podstawy teoretyczne analizy czystości płynów. W rozdz. 5 są omówione w szerszym zakresie najbardziej rozpowszechnione metody i urządzenia badawcze.

Kryteria oceny wymiarów porów. Przyjmowane do oceny efektywności filtrowania filtrów porowatych, kryteria oparte na badaniach wkładu filtracyjnego (dalej nazywanego przegrodą filtracyjną) można sprowadzić do wyznaczenia największego albo innego zastępczego wymiaru poru lub do wyznaczania rozkładu wymiarów porów przegrody filtracyjnej. Wyznaczanie wymiarów porów jest związane zwykle z założeniem, że przyjęty wymiar poru określa nominalnie odpowiadające mu wymiary zanieczyszczeń zatrzymywanych przez przegrodę filtracyjną.

Stosowane przegrody filtracyjne mają bardzo zróżnicowaną budowę. Istnieją takie, które pracują tylko powierzchniowo (np. sita filtracyjne, tkaniny, wkłady drutowe, płytkowe itp.) lub też — powierzchniowo i włącznie (np. spieki metalowe i ceramiczne, tworzywa sztuczne, tektura itp.). Dla pierwszych z nich określenie wymiaru nominalnego poru jest możliwe z prostych zależności geometrycznych na podstawie danych konstrukcyjnych przegrody. Dla sit filtracyjnych o oczkach kwadratowych będzie to wymiar odległości między krawędziami wewnętrznymi drutu w oczku, dla niektórych wkładów płytkowych — rozstaw płytek itd. Dla przegród filtracyjnych o budowie bardziej złożonej, pracującej również włącznie najbardziej rozpowszechniły się metody wyznaczania wymiarów największego poru przy użyciu *porometrów* wykorzystujących zjawisko napięcia powierzchniowego cieczy. C. Barus opierając się na pomiarze ciśnienia „pierwszego pęcherzyka gazu” podał w 1894 r. pierwszy poprawny wzór do obliczania wymiaru poru przy założeniu, że kształt poru jest cylindryczny. Wzór ten zmodyfikował laboratoryjnie w r. 1908 J. Bechhold. Jedną z wersji metody laboratoryjnej podaje norma brytyjska, wg której *największa średnica poru* jest wyznaczona na podstawie wzoru P. S. de Laplace’a, z 1806 roku. Jest to zastępcza (obliczeniowa) średnica poru, będąca miarą najmniejszego zwężenia w największym porze materiału. Opracowane w Polsce niektóre zalecenia prowadzą do sprawdzania *średniej obliczeniowej wielkości porów* filtrów formowanych z kulistego proszku brązu i następnie spiekanych — bez prasowania, do zastosowań w układach pneumatycznych i hydraulicznych.

Bardziej miarodajnym kryterium oceny efektywności filtrowania jest jednak, ze względu na wymagania stawiane filtrom płynów roboczych, rozkład wymiarów porów. Dotychczasowe zalecenia dotyczące filtrów pneumatycznych i hydraulicznych nie przewidują w zasadzie takich badań sprawdzających. Pomiar rozkładu wymiarów porów jak dotychczas znalazły zastosowanie w testowaniu laboratoryjnym materiałów porowatych w badaniach naukowych. W zakresie badań przegród filtracyjnych, ograniczone zastosowanie wyznaczania rozkładu wymiarów porów wynika głównie z trudności realizacyjnych i niedostatecznego docenienia uzyskanych danych. Opracowaną w 1945 roku przez H. L. Rittera i L. C. Drake'a metodę wyznaczania rozkładu porów przez wtłaczanie rtęci do materiału porowatego wykorzystano następnie do określania przepuszczalności płynów przez grunty i skały (N. T. Burdine i inni, 1950). Dalsze prace z tej dziedziny umożliwiły udoskonalenie techniki pomiarów. W. Fischer i D. Jahn w 1968 r. opisali metodę określenia rozkładu objętości porów w funkcji ich wymiarów. Zwracają przy tym uwagę na wpływ różnych czynników fizyko-chemicznych na różnice w uzyskanych wynikach.

Tak więc dotychczasowy stan oceny efektywności filtrowania związany z badaniem wymiarów porów przegrody filtracyjnej, dotyczący określenia największego wymiaru poru, opiera się w zasadzie na metodzie Barusa-Bechholda.

Należy dodać, że niekiedy do oceny filtrów, których wkłady są wykonane z nieprasowanego proszku kulistego, przyjmuje się jako kryterium wymiaru poru — średnicę okręgu wpisanego między stycznie przylegające kulki o jednakowych wymiarach, np. dla ich tetraoktaedrycznego ułożenia lub dla innych ułożeń i dla różnych średnic kulek stykających się ze sobą.

Kryteria oceny czystości płynów roboczych. Dotychczas najbardziej rozpowszechnionymi metodami oceny efektywności filtrowania płynów roboczych są metody oparte na określaniu ilości cząstek zanieczyszczeń przed i po przejściu płynu przez przegrodę filtracyjną filtru mechanicznego lub przez filtr działający na innej zasadzie.

Najczęściej ilość cząstek zanieczyszczeń jest wyrażona przez wskaźnik koncentracji z będący liczbą cząstek n w sztukach występujących w stałej objętości płynu (np. w 100 ml cieczy). Wskaźnik ten dotyczy cząstek zanieczyszczeń o wymiarach w zakresie mierzalnym przy użyciu dostępnych metod analizy mikroobiektywów. Dla rozpowszechnionych układów płynowych dolną granicę określanych wymiarów stanowią cząstki o średnicy 5 μm , rzadziej 1, 0,5 lub 0,2 μm .

Ze względu na spotykane w praktyce różne metody pomiaru ilości zanieczyszczeń są również wprowadzane inne wskaźniki ilości zanieczyszczeń. Należą do nich: koncentracja wagowa i objętościowa zanieczyszczeń oraz wskaźniki oparte na tych własnościach fizyko-chemicznych lub geometrycznych cząstek, którymi są przyporządkowane jednoznacznie określone ilości cząstek zanieczyszczeń.

Do najprostszych metod oceny efektywności filtrowania opartych na określeniu ilości zanieczyszczeń należą *metody subiektywne kontroli czystości płynów roboczych*. Polegają one na obserwacji wizualnej zanieczyszczonego płynu bezpośrednio (np. porównanie barwy czystej cieczy i zanieczyszczonej przed i za filtrem) lub obserwacji z zastosowaniem pomocniczych przyrządów optycznych i filtrów kontrolnych, z wykorzystaniem np. światła przechodzącego przez oświetloną i widoczną powierzchnię sita filtracyjnego itp. Metody subiektywne, proste w stosowaniu, nie zapewniają uzyskania informacji ilościowych, a zakres jakościowej oceny filtrowania jest ograniczony dolną granicą obserwacji wymiarów cząstek rzędu $5\div 10\ \mu\text{m}$.

Metody obiektywne kontroli czystości płynów roboczych polegają na zastosowaniu pomocniczych urządzeń do analizy mikroobiektów, w postaci czujników działających na różnych zasadach oraz analizatorów ilości i wymiarów zanieczyszczeń.

Najbardziej rozpowszechnionymi metodami analizy składu granulometrycznego zanieczyszczeń są metody oparte na wykorzystaniu *sedymentacji* (metoda sedymentacyjno-wagowa, metoda fotosedymentacyjna, metoda ultrawirówek itd.) oraz *metody mikroskopowe* polegające na analizie pola obserwacji próbki zanieczyszczonego płynu lub osadu na ultradrobnej przeponie filtracyjnej. Stosuje się wiele urządzeń z mikroskopem umożliwiających półautomatyczne lub całkowicie zautomatyzowane liczenie i „porządkowanie” wymiarów cząstek zanieczyszczeń wg dowolnych zasad. Oprócz metod wykorzystujących efekty kontrastu optycznego rozpowszechniły się w ostatnim okresie metody oparte na wykorzystaniu efektów kontrastu elektrycznego, kontrastu akustycznego itd. między płynem roboczym a zanieczyszczeniem.

W użyciu znajdują się liczniki i analizatory zanieczyszczeń wielu firm specjalizujących się w produkcji tego typu aparatury. Do najbardziej znanych należą liczniki Coulter, Celloskope, Bowser, Casella, Metals Research, Opton. W szerokim zakresie omówiono metody badań i urządzenia w rozdz. 5.

Możliwość liczenia cząstek zanieczyszczeń i określenia ich wymiarów (średnica, powierzchnia rzutu, objętość) pozwala na wprowadzenie kryteriów oceny efektywności filtrowania uwzględniających rozkład wymiarowy zanieczyszczeń

w płynie. Stosowane są różnie definiowane kryteria oceny, do których należy przede wszystkim *współczynnik przepuszczania zanieczyszczeń*

$$\varphi = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{lub} \quad \varphi = \frac{n_2}{n_1} 100\% \quad (4.1)$$

oraz *współczynnik odfiltrowania zanieczyszczeń*

$$\psi = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad \text{lub} \quad \psi = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100\% \quad (4.2)$$

wyrażany w funkcji wymiarów cząstek, np. promieni lub średnic d_i , jako krzywa odfiltrowania

$$\psi_i = f(d_i) \quad (4.3)$$

gdzie: n_1, n_2 — liczba cząstek zanieczyszczeń określonego wymiaru w jednakowych próbkach płynu odpowiednio przed i po filtrowaniu.

Z porównania obu wyrażeń (4.1) i (4.2) wynika następująca zależność

$$\psi = 1 - \varphi \quad (4.4)$$

Innym wskaźnikiem oceny efektywności filtrowania jest *wskaźnik wymiaru oddzielonego efektywnie* wprowadzony przez R. W. Cranstona. Ilościowym wyrażeniem zanieczyszczeń jest tutaj pole C pod krzywą $n_2(x)$ (rys. 4.1).

$$C = \int_{x=D}^{x=x_{max}} n_2(x) dx \quad (4.5)$$

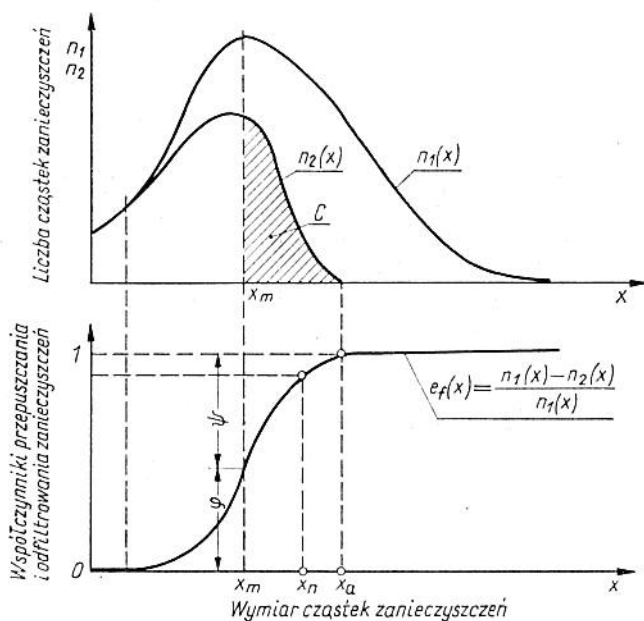
gdzie: x — wymiar cząstek zanieczyszczeń, D — wymiar cząstek zanieczyszczeń, których ilość w niefiltrowanym płynie była największa.

Wskaźnik wymiaru oddzielonego efektywnie jest wygodny w stosowaniu przy ocenie porównawczej różnych filtrów ponieważ liczy się jedynie nieznaczną ilość zanieczyszczeń w próbkach odfiltrowanego płynu o wymiarach x większych od raz określonego wymiaru D charakteryzującego płyn filtrowany.

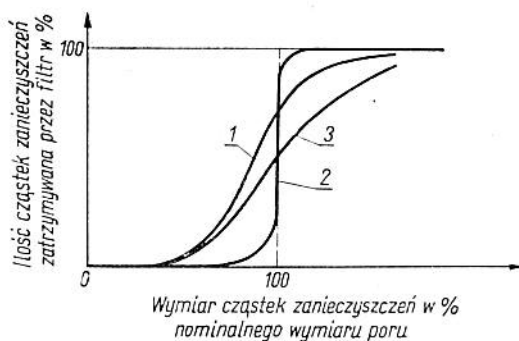
Na rys. 4.1 przedstawiono graficznie zależność liczby cząstek zanieczyszczeń n_1 i n_2 od ich wymiarów oraz wskaźniki oceny efektywności filtrowania ze względu na wymiar: D : φ_D, ψ_D, C oraz krzywą odfiltrowania $\psi(x)$. Można również wyrazić ilość cząstek zanieczyszczeń zatrzymanych przez filtr w zależności od wymiarów cząstek w procentach umownego nominalnego wymiaru porów

filtru. Zastosowanie takich współrzędnych umożliwia ocenę rozrzutu charakterystyk filtracyjnych różnych filtrów (rys. 4.2) o jednakowej nominalnej dokładności.

Lepszą z punktu widzenia praktyki jest ocena efektywności filtrowania na podstawie pojęcia *filtru absolutnego* i *filtru nomi-*



Rys. 4.1. Interpretacja graficzna wskaźników oceny efektywności filtrowania płynów roboczych; najczęściej stosowanymi wskaźnikami są: $u_2(x)$, C , $e_f(x)$, $\psi(x_m)$, $\varphi(x_m)$, x_a i x_n



Rys. 4.2. Porównanie charakterystyk filtracyjnych różnych filtrów porowatych; 1 — filtr bibułowy, 2 — filtr siatkowy, 3 — filtr granulkowy

nalnego. Filtr absolutny o dokładności x jest to filtr, dla którego x jest wymiarem najmniejszych cząstek zanieczyszczeń zatrzymywanych przez ten filtr w ilości 100% (lub umownie 99,95%), natomiast *filtr nominalny o dokładności x* jest to filtr, dla którego x jest również wymiarem najmniejszych cząstek zanieczyszczeń zatrzymywanych przez filtr, lecz w ilości umownej 98% lub rzadziej 95%, czy też 50%.

Z podanych definicji wynika, że pojęcie *filtru absolutnego* i *nominalnego* oraz stosowanych często równoważnych pojęć *absolutnej* i *nominalnej dokładności oczyszczania filtra* są związane z pojęciem *współczynnika odfiltrowania*.

Przedstawione wyżej rozważania nad kryteriami oceny efektywności filtrowania związane z pojęciem wymiaru cząstek zanieczyszczeń płynu roboczego, wskazują na celowość wyboru krzywej odfiltrowania jako najbardziej miarodajnej charakterystyki przeznaczonej do oceny efektywności filtrowania.

Oprócz wspomnianych wyżej metod oceny efektywności filtrowania płynów roboczych, polegających na doświadczalnym lub doświadczalno-analitycznym wyznaczaniu umownych wskaźników lub charakterystyk, istnieje tendencja do stosowania analitycznego opisu, zawierającego określenie dynamiki procesu filtrowania, w tym również — zmiany efektywności filtrowania w czasie.

Jak dotychczas, dzięki przyjęciu różnych modeli przebiegu procesu filtrowania, udało się opisać analitycznie zmiany oporów przepływu cieczy roboczej przez przegrodę filtracyjną oraz zmianę w czasie ilości porów przegrody. Ze względu na małą przydatność praktyczną takich zależności, nie są one powszechnie wykorzystywane w opracowaniach projektowych z zakresu filtrów i filtrowania płynów roboczych.

Nowy sposób rozwiązywania tych zagadnień zaproponowano w Polsce, przy uwzględnieniu charakterystyk metrologicznych przegrody filtracyjnej i rozkładu wymiarów cząstek zanieczyszczeń. Opierając się na rachunku prawdopodobieństwa wyznaczono podstawową zależność procesu filtrowania uwzględniającą rozkład wymiarów cząstek zanieczyszczeń i rozkład wymiarów porów przegrody filtracyjnej oraz udowodniono równoważność charakterystyki odfiltrowania z dystrybuantą hydrodynamiczną przegrody filtracyjnej. Pojęcia te będą wyjaśnione dalej.

Możliwość analitycznego opisu procesu filtrowania z uwzględnieniem ważnego szczególnie do zastosowań w hydraulicznych układach automatyki, rozkładu wymiarowego cząstek zanieczyszczeń, a ponadto wyznaczenie analityczne efektywności filtrowania, umożliwiają rozpatrywanie teoretyczne wpływu procesu filtrowania na działanie układów hydraulicznych podczas ich pracy.

4.1.2. Przybliżona charakterystyka odfiltrowania

Przedstawiamy tutaj przybliżoną postać charakterystyki odfiltrowania uwzględniającą rozrzut wymiarów x cząstek zanieczyszczeń oraz wymiary y porów filtru. *Charakterystykę odfiltrowania* $e_f(x)$ zdefiniujemy jako kolejne punkty stosunku różnicy ilości cząstek zanieczyszczeń w pewnej kontrolnej objętości V przed filtrowaniem $g_n(x)$ i ilości cząstek w tej samej objętości płynu, która została przefiltrowana $r_n(x)$, do ilości cząstek $g_n(x)$, czyli

$$e_f(x) = 1 - \frac{r_n(x)}{g_n(x)} \quad (4.6)$$

We wzorze (4.6), $g_n(x)$ i $r_n(x)$ są funkcjami ciągłymi aproksymującymi ilość cząstek poszczególnych średnic x w płynie, odpowiednio przed i za filtrem.

Filtrowanie mechaniczne możemy uważać z metrologicznego punktu widzenia jako proces segregowania cząstek zanieczyszczeń polegający na tym, że cząstki trafiające na pory filtru mniejsze od swoich wymiarów są zatrzymywane, a cząstki trafiające na pory większe są przepuszczane. Istnieje zatem zależność charakterystyki odfiltrowania od wymiarów porów materiału filtracyjnego. Poniższe rozważania mają na celu określenie przybliżonej postaci tej zależności.

Niech $f(y)$ będzie funkcją opisującą względny udział ilości porów o kolejnych średnicach y w przepływie płynu zdefiniowany jako

$$f(y) = \frac{f_n(y)}{\int_0^{\infty} f_n(y) dy} \quad (4.7)$$

gdzie: $f_n(y)$ — funkcja ciągła aproksymująca analitycznie rozkład ilości porów występujących w rzeczywistym materiale filtracyjnym.

Przyjmujemy dla uproszczenia, że przepływ płynu nie jest zależny od różnych średnic y porów, a tylko od ich ilości. Założenie to jest spełnione w przybliżeniu wtedy, gdy rozrzut wymiarowy porów jest niewielki, tzn. gdy natężenia przepływu przez pory największe i pory najmniejsze filtru różnią się nieznacznie.

Niech wskaźnik ψ_i określa udział cząstek o średnicach x_i natrafiających na swej drodze na pory materiału filtracyjnego o średnicach $y_i < x_i$. Cząstki te ulegną zatrzymaniu, a ich względną ilość wyrażać będzie ilość porów o średnicach $y_i < x_i$. Zatem

$$\psi_i = \int_0^{x_i} f(y) dy = F(x_i) \quad (4.8)$$

Jeżeli przez $g(x) = \frac{g_n}{\int_0^\infty g_n(x) dx}$ oznaczymy funkcję opisującą

względny rozkład ilości cząstek w kontrolnej objętości V płynu, a przez $c(x)$ i $r(x)$ funkcję względnej ilości cząstek z tej objętości odpowiednio zatrzymanych w materiale filtracyjnym, i przepuszczonych przez filtr, to

$$g(x) = c(x) + r(x) \quad (4.9)$$

Niech dla cząstek zanieczyszczeń o średnicach zawartych w dowolnym przedziale domkniętym $[x_i, x_i + \Delta x]$, w którym funk-

cje $c(x)$ i $g(x)$ są całkowalne, a $\int_{x_i}^{x_i + \Delta x} d(x) dx = 0$, wskaźnik

$$\psi = \frac{\int_{x_i}^{x_i + \Delta x} c(x) dx}{\int_{x_i}^{x_i + \Delta x} g(x) dx} \quad (4.10)$$

wyraża stosunek ilości cząstek zatrzymanych w porach filtru do ilości cząstek przed filtrowaniem z kontrolnej objętości V .

Na podstawie twierdzenia o wartości średniej całki oznaczonej możemy zapisać

$$\int_{x_i}^{x_i + \Delta x} g(x) dx = \Delta x g(x_g) \quad (4.11)$$

$$\int_{x_i}^{x_i + \Delta x} c(x) dx = \Delta x c(x_c) \quad (4.12)$$

gdzie x_g i x_c są wartościami z przedziału $[x_i, x_i + \Delta x]$, dla których funkcje $g(x)$ i $c(x)$ przyjmują odpowiednio wartości średnie w przedziale.

Podstawiając (4.11) i (4.12) do (4.10), otrzymujemy

$$\psi = \frac{c(x_c)}{g(x_g)} \quad (4.13)$$

Wskaźnik ten można interpretować jako udział cząstek zatrzymanych przez filtr w stosunku do wszystkich cząstek znajdujących się w cieczy przed filtrowaniem.

Zatem gdy $\Delta x \rightarrow 0$, to $\psi \rightarrow \psi_i$.

Ponieważ w przypadku $\Delta x \rightarrow 0$, wartości x_g i x_c zbiegają do x_i , więc otrzymujemy

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \psi = \psi_i = \frac{c(x_i)}{g(x_i)} \quad (4.14)$$

Z (4.8) i (4.14) wynika, że

$$\frac{c(x_i)}{g(x_i)} = F(x_i) \quad (4.15)$$

Ponieważ x_i jest dowolnym wymiarem cząstki zanieczyszczenia lub poru materiału filtracyjnego, możemy ogólnie na podstawie (4.15) napisać

$$c(x) = g(x) F(x) \quad (4.16)$$

lub uwzględniając (4.6) i (4.9)

$$e_f(x) = F(x) = \int_0^x f(y) dy \quad (4.17)$$

Ze wzoru (4.17), określającego charakterystykę odfiltrowania właściwą tylko materiałowi filtracyjnemu wynika, że można uniknąć pracochłonnego liczenia ilości cząstek zanieczyszczeń stosując badanie tylko samej przegrody filtracyjnej. Jest to ważne spostrzeżenie prowadzące do obiektywnego określenia własności filtracyjnych filtrów mechanicznych.

Wynik zapisany wzorem (4.17) należy interpretować z pewną ostrożnością. Jeżeli przyjmiemy, że w płynie roboczym znajdują się cząstki zanieczyszczeń o dowolnych wymiarach, a filtr ma pory o jednym tylko wymiarze, to charakterystyka odfiltrowania, niezależnie do natężenia przepływu płynu, będzie zawsze określana „skokiem jednostkowym” rozpoczynającym się od wartości równej wymiarom porów. Jeżeli wymiary porów będą różniły się między sobą, wzór (4.17) nie odzwierciedla rzeczywistego przebiegu charakterystyki odfiltrowania. Na przykład w przypadku filtru o wymiarach porów o rozkładzie równomiernym, określonych na odcinku między y_1 i y_2 , charakterystyka odfiltrowania wyznaczona za pomocą wzoru (4.17) będzie mieć charakter trapezoidalnoskokowy o wartości 0 dla $x = y_1$ i wartości 1 dla $x = y_2$. W rzeczywistości, w tym przypadku przebieg $e_f(x)$ będzie różnił się od tego przebiegu zależnie od stanu przepływu płynu przez pory materiału filtracyjnego. Jedynie wartości charakterystyki dla $x < y_1$ i $x > y_2$ nie ulegną zmianie.

Zagadnienie analitycznego wyznaczania charakterystyki odfiltrowania będzie dalej rozpatrzone bardziej wnikliwie, z uwzględnieniem wielu dodatkowych założeń i niezbędnych uproszczeń.

Należy zdawać sobie sprawę z tego, że filtrowanie płynów w warunkach rzeczywistych jest procesem losowym i w związku z tym ścisły opis przebiegu takiego procesu można jedynie uzyskać stosując wzory statystyki matematycznej. Zgodność opisu matematycznego z rzeczywistym przebiegiem procesu filtrowania zależy będzie głównie od przyjęcia właściwych założeń analizy procesu i sprawdzenia, czy wyniki teoretyczne są zgodne z wynikami uzyskanymi w praktyce.

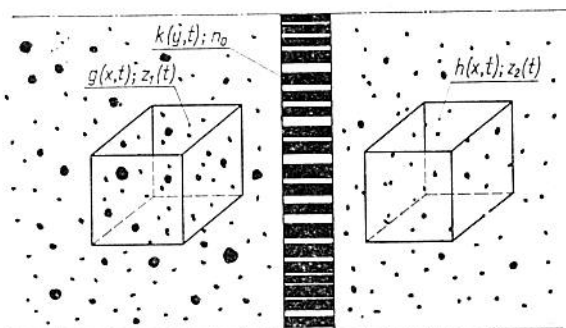
4.1.3. Rozkład zanieczyszczeń w płynie

Wykazaliśmy poprzednio, że krzywa odfiltrowania najlepiej określa własności filtracyjne przegrody, a znajomość zmian tych własności w czasie pracy układu umożliwi ocenę działania urządzeń płynowych. Zwróciliśmy również uwagę na brak, jak dotychczas, rozwiązania teoretycznego zagadnienia związanego z wyznaczaniem efektywności filtrowania oraz na prowadzenie badań nad określeniem wpływu zanieczyszczeń na pracę płynowych elementów i układów. Powiązanie danych uzyskanych przy teoretycznym wyznaczaniu efektywności filtrowania z danymi uzyskanymi w wyniku doświadczeń znajduje uzasadnienie w praktyce. Wynika to stąd, że przegroda filtracyjna jest złożona najczęściej z bardzo dużej ilości porów o wymiarach zawierających się w pewnym zakresie, który można jedynie zgrubnie oszacować na podstawie konstrukcji przegrody i procesu technologicznego jej wykonania.

Ze względu na coraz większe wymagania w zakresie czystości płynów roboczych, uzyskanie informacji związanych z efektywnością filtrowania jest konieczne. Problem sprowadza się do określenia pod względem teoretycznym efektywności filtrowania w takim stopniu, aby niezbędne badania były możliwie krótkotrwałe i niezbyt kosztowne.

Przyjęliśmy już, że rozpatrywać będziemy tylko filtrowanie mechaniczne. Wprowadzimy pojęcie układu dynamicznego złożonego z trzech elementów, którymi będą: płyn roboczy, cząstki zanieczyszczeń (zanieczyszczenia) oraz przegroda filtracyjna. Istotny jest taki stan układu dynamicznego, w którym cząstki zanieczyszczeń zawieszony w płynie przepływają przez nieruchomą przegrodę filtracyjną. Płyn roboczy jest elementem przenoszącym cząstki zanieczyszczeń i dla rozważanych tutaj przepływów, właściwości „nośne” nie mają większego znaczenia. Zakładamy, że koncentracja objętościowa zanieczyszczeń w płynie roboczym jest taka mała, że pomijalny jest wpływ na lepkość płynu, a przepływ jest realizowany tak, aby zapewnić równomierne przeniesienie cząstek zanieczyszczeń.

Zakładamy, że cząstki zanieczyszczeń zawieszony w płynie roboczym są twarde i mają kształt kulisty (rys. 4.3). Promienie cząstek oznaczamy będziemy przez x , a rozkład prawdopodobieństwa ich wymiarów w danym czasie t opiszemy funkcjami gęstości $g(x, t)$ i $h(x, t)$ odpowiednio dla płynu przed i za przegradą fil-



Rys. 4.3. Schemat uproszczonego modelu filtrowania mechanicznego płynów

tracyjną. Zakładamy, że pory przegrady filtracyjnej są kapilarami o jednakowej długości. Promienie porów oznaczamy będziemy przez y , a rozkład prawdopodobieństwa wymiarów porów opiszemy funkcją gęstości $f(y, t)$. Będziemy rozpatrywali taki model procesu filtrowania, w którym cząstka zanieczyszczenia trafiająca na por zatyka go całkowicie, gdy promień x jest większy od promienia y . Założymy dodatkowo, że nie ma oddziaływań fizyko-chemicznych, które by wpływały na zmianę wymiarów cząstek zanieczyszczeń i porów przegrady filtracyjnej. Z założenia tego wynika przede wszystkim, że nie istnieje koagulacja cząstek zanieczyszczeń znajdujących się w cieczy i obliteracja porów.

W celu wyznaczenia charakterystyki odfiltrowania przeprowadzimy analizę porów przegrady filtracyjnej oraz rozważymy zależności występujące między ilością a rozkładem wymiarów cząstek zanieczyszczeń w płynie roboczym przed i po przejściu przez przegradę filtracyjną. Do tego celu zastosujemy wzory analizy statystycznej.

Dokonyamy podziału funkcji $g(x, t)$ na dwie gęstości defektywne

$$g(x, t) = g_A(x, t) + g_B(x, t) \quad (4.18)$$

tak aby funkcja $g_A(x, t)$ odpowiadała cząstkom przepuszczonym przez przegradę filtracyjną, natomiast funkcja $g_B(x, t)$ — cząstkom zatrzymanym w przegradzie filtracyjnej. Uważając wymiary wpadających kolejno do przegrady filtracyjnej cząstek za zdarzenia niezależne można powyższe funkcje zdefiniować następująco

$$g(x, t) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0^+} \frac{P\{x \leq X(t) < x + \Delta x\}}{\Delta x} \quad (4.19)$$

$$g_A(x, t) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0^+} \frac{P\{A_t[x, x + \Delta x]\}}{\Delta x} \quad (4.20)$$

$$g_B(x, t) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0^+} \frac{P\{B_t[x, x + \Delta x]\}}{\Delta x} \quad (4.21)$$

Symbolem $A_t[x, x + \Delta x)$ oznaczono tutaj zdarzenie polegające na tym, że wartość zmiennej losowej $X(t)$ czyli wymiar cząstki wpadającej w chwili t do przegrody filtracyjnej mieści się w przedziale $[x, x + \Delta x)$ i że cząstka ta przechodzi przez przegrodę; symbolem $B_t[x, x + \Delta x)$ oznaczono zdarzenie, w którym cząstka ta spełnia ten sam warunek w odniesieniu do jej wymiaru, ale zostaje zatrzymana w porach przegrody.

Na podstawie definicji krzywej odfiltrowania zapiszemy zależność $\psi(x)$ dla dowolnego czasu t równą $e_f(x, t)$, którą będziemy nazywać *charakterystyką odfiltrowania*. Oznaczając przez $n_1(x, t)$ i $n_2(x, t)$ liczbę cząstek zanieczyszczeń odpowiednio przed i po filtrowaniu płynu w jednakowej objętości w danym czasie t , a przez $e_p(x, t)$ — charakterystykę przepuszczania, możemy wówczas napisać

$$e_f(x, t) = \frac{n_1(x, t) - n_2(x, t)}{n_1(x, t)} = 1 - e_p(x, t) \quad (4.22)$$

oraz na podstawie (4.18)

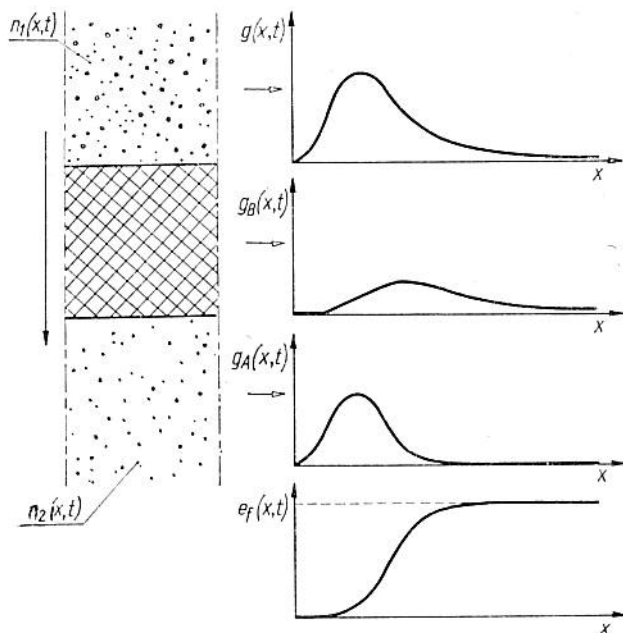
$$e_f(x, t) = \frac{g(x, t) - g_A(x, t)}{g(x, t)} \quad (4.23)$$

lub

$$e_f(x, t) = \frac{g_B(x, t)}{g(x, t)} \quad (4.24)$$

Różnica w zapisie zależności (4.22) oraz (4.23) i (4.24) polega na tym, że $g(x, t)$ jest rzeczywistą, nieujemną, całkowaną w zakresie $x = 0$, do $x = +\infty$ funkcją gęstości zmiennej losowej $X(t)$ typu ciągłego, natomiast w odniesieniu do $n_1(x, t)$ i $n_2(x, t)$ nie narzucamy warunku ciągłości (rys. 4.4).

Nadanie zależnościom (4.23) i (4.24) interpretacji statystycznej umożliwi na podstawie (4.19), (4.20) i (4.21) określenie $e_f(x, t)$ jako *prawdopodobieństwa zatrzymania cząstki zanieczyszczeń o promieniu x w przegrodzie filtracyjnej*, a $e_p(x, t)$ jako *prawdopodobieństwa przepuszczenia cząstki zanieczyszczeń o promieniu x przez przegrodę filtracyjną*. Istotnie, ponieważ



Rys. 4.4. Interpretacja graficzna charakterystyki odfiltrowania

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0+} \frac{P\{B_f[x, x+\Delta x]\}}{\Delta x} = e_f(x, t), \quad \lim_{\Delta x \rightarrow 0+} \frac{P\{x \leq X(t) < x+\Delta x\}}{\Delta x} \quad (4.25)$$

przeto

$$g_A(x, t) = e_p(x, t) g(x, t) \quad (4.26)$$

$$g_B(x, t) = e_f(x, t) g(x, t) \quad (4.27)$$

W celu uproszczenia zapisu wprowadzimy funkcję Ξ określoną następującą formułą

$$\Xi_x f(x, \beta) = \frac{f(x, \beta)}{\int_{-\infty}^{+\infty} f(x, \beta) dt}$$

Z warunku normalizacji

$$h(x, t) = \Xi_x [g_A(x, t)] \quad (4.28)$$

i na podstawie (4.26)

$$h(x, t) = \Xi_x \{g(x, t) [1 - e_f(x, t)]\} \quad (4.29)$$

Wzór (4.29) wiążący funkcję gęstości rozkładu prawdopodobieństwa ilości cząstek o promieniach x w dowolnym czasie t

przed i za przegrodą filtracyjną z charakterystyką odfiltrowania, umożliwia analizę dynamiki procesu filtrowania mechanicznego, a więc ocenę zmian efektywności filtrowania w czasie. Wykażemy dalej, że powiązanie charakterystyki odfiltrowania z własnościami przegrody filtracyjnej umożliwi poczynienie dalszych wniosków upraszczających wyznaczenie efektywności filtrowania płynów roboczych. W tym celu przeanalizujemy przegrodę filtracyjną.

4.1.4 Analiza porów przegrody filtracyjnej

Rozpatrzmy przegrodę filtracyjną jako populację generalną n porów o funkcji rozkładu ich ilości $f(y, t)$. Zakładamy, że funkcja $f(y, t)$ jest rzeczywistą, nieujemną, całkowaną w zakresie od 0 do $+\infty$ i spełniającą równość $\int_0^{\infty} f(y, 0) dy = 1$ funkcją gęstości zmiennej losowej Y typu ciągłego. Z założenia tego wynika, że w przegrodzie nie występują pory jednakowe. Zakładamy również, że zdarzenia występowania porów otwartych i porów zamkniętych są niezależne.

Na początku zadania wyznaczmy funkcję gęstości rozkładu porów otwartych w dowolnym czasie t zgodnie z przyjętą tutaj zależnością dzielącą funkcję gęstości rozkładu ilości porów przy $t = 0$ na dwie gęstości defektywne.

$$f_0(y) = f_A(y, t) + f_B(y, t) \quad (4.30)$$

gdzie: $f_A(y, t)$, $f_B(y, t)$ — gęstości defektywne określające rozkłady porów w czasie t filtrowania odnoszące się odpowiednio do porów otwartych i porów zamkniętych.

Weźmy pod uwagę przedział $(y_k, y_k + \Delta y)$ funkcji gęstości $f_0(y) = f(y, 0)$. Rozpatrzmy populacje próbne utworzone z porów otwartych powyższego przedziału i porów znajdujących się poza tym przedziałem w chwili $t = 0$ oraz po upływie dowolnego czasu $t > 0$ filtrowania.

Prawdopodobieństwo $Q_n(m)$, że w chwili $t = 0$ w przedziale $(y_k, y_k + \Delta y)$ było m porów otwartych jest równe

$$Q_n(m) = \binom{n}{m} r_0^m (1 - r_0)^{n-m} \quad (4.31)$$

przy czym prawdopodobieństwo istnienia poru w tym przedziale w chwili $t = 0$

$$r_0 = \int_{y_k}^{y_k + \Delta y} f_0(y) dy \quad (4.32)$$

Prawdopodobieństwo $R_m(v)$, że po upływie czasu t z ilości m porów pozostałe tylko v jest równe

$$R_m(v) = \binom{m}{v} r^v (1-p)^{m-v} \quad (4.33)$$

gdzie: r — prawdopodobieństwo istnienia poru w tym przedziale w chwili t .

Jeżeli całkowita ilość porów przegrody filtracyjnej w chwili $t = 0$ była równa n , wówczas jest określone wzorem prawdopodobieństwo $T_n(m)$, że po upływie czasu t ilość porów w przedziale będzie równa v

$$\begin{aligned} T_n(v) = & Q_n(v) R_v(v) + Q_n(v+1) R_{v+1}(v) + \\ & + Q_n(v+2) R_{v+2}(v) + \dots + Q_n(i) R_i(v) + \dots + \\ & + Q_n(n) R_n(v) = \sum_{i=v}^n Q_n(i) R_i(v) \end{aligned} \quad (4.34)$$

czyli ostatecznie

$$T_n(v) = \sum_{i=v}^n \binom{n}{i} \binom{i}{v} r_0^i (1-r_0)^{n-i} r^v (1-r)^{i-v} \quad (4.35)$$

$$\sum_{v=0}^n T_n(v) = 1 \quad (4.36)$$

Przyjmując wartość przeciętną zmiennej losowej równą sumie iloczynów poszczególnych wartości tej zmiennej przez odpowiadające tym wartościom prawdopodobieństwa oraz uwzględniając prawdopodobieństwo r_0 , że por znalazł się w przedziale $(y_k, y_k + \Delta y]$ i prawdopodobieństwo r , że por został w tym przedziale do chwili t przy całkowitej ilości porów n , dochodzimy do następującego wniosku

$$\sum_{v=0}^n v T_n(v) = n r_0 r \quad (4.37)$$

Jeżeli przez $A_n(l)$ oznaczymy prawdopodobieństwo, że w chwili $t = 0$ to w przedziale $(y_k, y_k + \Delta y]$ znajdowało się $l = n - m$ porów, to

$$A_n(l) = Q_n(n-l) \quad (4.38)$$

Ze względu na równość $\binom{n}{n-l} = \binom{n}{l}$, otrzymamy

$$A_n(l) = \binom{n}{l} r_0^{n-l} (1-r_0)^l \quad (4.39)$$

Prawdopodobieństwo $B_l(w)$, że po upływie czasu t z ilości l porów pozostało ich tylko w jest równe

$$B_l(w) = \binom{l}{w} p^w (1-p)^{l-w} \quad (4.40)$$

gdzie: p — prawdopodobieństwo istnienia poru otwartego poza przedziałem po upływie czasu t .

Prawdopodobieństwo $D_n(w)$, że poza rozważnym przedziałem znajduje się w porów, wynosi

$$\begin{aligned} D_n(w) &= A_n(w)B_w(w) + A_n(w+1)B_{w+1}(w) + A_n(w+2)B_{w+2}(w) \\ &\quad + \dots + A_n(k)B_k(w) + \dots + A_n(n)B_n(w) = \\ &= \sum_{k=w}^n A_n(k)B_k(w) \end{aligned} \quad (4.41)$$

i ostatecznie

$$D_n(w) = \sum_{k=w}^n \binom{n}{k} \binom{k}{w} r_0^{n-k} (1-r_0)^k p^w (1-p)^{k-w} \quad (4.42)$$

Oczywiście musi być przy tym spełniona zależność

$$\sum_{w=0}^n D_n(w) = 1 \quad (4.43)$$

oraz dochodzimy do wniosku, że

$$\lim_{\Delta y \rightarrow 0} \sum_{w=0}^n w D_n(w) = np \quad (4.44)$$

Rozpatrzmy teraz prawdopodobieństwo $P\{v+w = k | A_m\}$, że łączna ilość porów otwartych $v+w$ po czasie t jest równa k pod warunkiem zajścia zdarzenia A_m (gdzie $m = 0, 1, 2, \dots, n$) rozumianego jako zdarzenie występowania m porów w przedziale $(y_k, y_k + \Delta y]$ i $n-m = l$ porów poza tym przedziałem w chwili $t = 0$

$$\begin{aligned} P\{v+w = k | A_m\} &= R_m(0)B_l(k) + R_m(1)B_l(k-1) + \\ &\quad + R_m(2)B_l(k-2) + \dots + R_m(k)B_l(0) \end{aligned} \quad (4.45)$$

Oczywiście

$$\begin{cases} R_m(i) = 0 & \text{gd}y \quad i > m \\ B_l(j) = 0 & \text{gd}y \quad j > l \end{cases} \quad (4.46)$$

Jeżeli umówimy się, że $\binom{k_1}{k_2} = 0$ dla $k_2 > k_1$, to

$$\begin{aligned} P\{v+w=k|A_m\} &= \sum_{v=0}^k R_m(v) B_l(k-v) = \\ &= \sum_{v=0}^k \binom{m}{v} r^v (1-v)^{m-v} \binom{l}{k-v} p^{k-v} (1-p)^{l-(k-v)} \end{aligned} \quad (4.47)$$

a na podstawie prawdopodobieństwa zupełnego, prawdopodobieństwo w ogóle, że łączna ilość porów otwartych jest równa k , wynosi

$$\begin{aligned} P\{v+w=k\} &= \sum_{m=0}^n P\{A_m\} \sum_{v=0}^k R_m(v) B_l(k-v) = \\ &= \sum_{m=0}^n \binom{n}{m} r_0^m (1-r_0)^{n-m} \left[\sum_{v=0}^k \binom{m}{v} \binom{l}{k-v} r^v (1-r)^{m-v} p^{k-v} (1-p)^{l-(k-v)} \right] \end{aligned} \quad (4.48)$$

Oczywiście musi być przy tym spełniona zależność

$$\sum_{k=0}^n P\{v+w=k\} = 1 \quad (4.49)$$

4.1.5 Rozkład porów otwartych przegrody filtracyjnej

Wyprowadzone poprzednio zależności podstawowe, związane z określeniami prawdopodobieństw określonej ilości porów w dwu populacjach próbnych przegrody filtracyjnej złożonej z n porów, posłużą do wyznaczenia rozkładu porów otwartych filtru w dowolnym czasie, a ściślej do wyznaczenia zależności wiążącej gęstość defektywną $f_A(y, t)$ z funkcją gęstości $f(y, t)$. W tym celu posłużymy się dodatkowo dwoma pojęciami określającymi zdarzenia występowania porów w przedziale $[y_k, y_k + \Delta y]$ rozważanej przegrodzie.

Niech zdarzenie B_v (gdzie $v = 0, 1, 2 \dots n$) polega na tym, że po upływie czasu t mamy w przedziale v porów, a zdarzenia G_k (gdzie $k = 0, 1, 2 \dots n$) niech oznaczają występowanie k porów w przedziale i poza przedziałem łącznie.

Na podstawie (4.48) $P\{v+w=k\} = P(G_k)$ i dla G_0 otrzymamy

$$P(G_0) = \sum_{m=0}^n \binom{n}{m} r_0^m (1-r_0)^{n-m} \binom{m}{0} \binom{n-m}{0} (1-r)^m (1-p)^{n-m} \quad (4.50)$$

zatem

$$P(G_0) = \sum_{m=0}^n \binom{n}{m} \left[r_0(1-r) \right]^m \left[(1-r_0)(1-p) \right]^{n-m} \quad (4.51)$$

i stąd

$$\lim_{r_0 \rightarrow 0} P(G_0) = (1-p)^n \quad (4.52)$$

Obliczymy teraz $P(B_v \cdot G_k)$:

$$P(B_v \cdot G_k) = \sum_{m=0}^n P(B_v \cdot G_k \cdot A_m) \quad (4.53)$$

Ponieważ $m \geq v$ i $n-m \geq k-v$ oraz

$$P(B_v \cdot G_k \cdot A_m) = P(A_m) \cdot P(B_v | A_m) \cdot P(G_k | B_v A_m) \quad (4.54)$$

gdzie na podstawie (4.31)

$$P(A_m) = \binom{n}{m} r_0^m (1-r_0)^{n-m} \quad (4.55)$$

na podstawie (4.33)

$$P(B_v | A_m) = \binom{m}{v} r^v (1-v)^{m-v} \quad (4.56)$$

i na podstawie (4.40)

$$P(G_k | A_m \cdot B_v) = \binom{n-m}{k-v} p^{k-v} (1-p)^{n+v-m-k} \quad (4.57)$$

można wzór (4.53) przedstawić w postaci

$$P(B_v \cdot G_k) = \sum_{m=m_1}^{m_2} P(B_v \cdot G_k \cdot A_m) \quad (4.58)$$

przy czym

$$\left. \begin{aligned} m_1 &= v \\ m_2 &= n+v-k \end{aligned} \right\} \quad (4.59)$$

Oczywiście musi być przy tym spełniona zależność $v \leq k$.

Obliczymy teraz w celu sprawdzenia $P(B_0 \cdot G_0)$. Ponieważ $P(B_0 | G_0) = 1$ więc $P(B_0 \cdot G_0) = P(G_0)$, a na podstawie (4.58) przy $m_1 = 0$, $m_2 = n$, wyznaczymy

$$\begin{aligned} P(B_0 \cdot G_0) &= \sum_{m=0}^n \binom{n}{m} r_0^m (1-r_0)^{n-m} \binom{m}{0} (1-r)^m \binom{m-n}{0} (1-p)^{n-m} = \\ &= \sum_{m=0}^n \binom{n}{m} \left[r_0(1-v) \right]^m \left[(1-r_0)(1-p) \right]^{n-m} \end{aligned} \quad (4.60)$$

Istotnie otrzymaliśmy zależność (4.57), czego należało oczekiwać. Jeżeli przyjmiemy, że $k \neq 0$ i wprowadzimy oznaczenie

$$P'(B_v \cdot G_k) = P(B_v \cdot G_k | k \neq 0) \quad (4.61)$$

to

$$P'(B_v \cdot G_k) = \frac{p(B_v \cdot G_k)}{1 - P(G_0)} \quad (4.62)$$

Ponieważ

$$f(y_k, t) = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta y} R(r_0, r, p) \quad (4.63)$$

przy czym

$$\begin{aligned} R(r_0, r, p) &= \sum_k \sum_v \frac{v}{k} P'(B_v \cdot G_k) = \\ &= \frac{0}{1} \cdot P'(B_0 \cdot G_1) + \frac{1}{1} \cdot P'(B_1 \cdot G_1) + \dots + \frac{0}{2} P'(B_0 \cdot G_2) + \\ &+ \frac{1}{2} P'(B_1 \cdot G_2) + \dots + \frac{0}{k} P'(B_0 \cdot G_k) + \frac{1}{k} P'(B_1 \cdot G_k) + \dots + \\ &+ \frac{k}{k} P'(B_k \cdot G_k) + \dots + \frac{0}{n} P'(B_0 \cdot G_n) + \frac{1}{n} P'(B_1 \cdot G_n) + \dots + \\ &+ \frac{n}{n} P'(B_n \cdot G_n) \end{aligned} \quad (4.64)$$

zatem

$$R(r_0, r, p) = \frac{1}{1 - P(G_0)} \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \left[\sum_{v=1}^k v P(B_v \cdot G_k) \right] \quad (4.65)$$

Uwzględniając wyżej wyprowadzone zależności oraz dokonując niezbędnych przekształceń otrzymamy

$$f(y_k, t) = \frac{(1-p)^n}{1 - (1-p)^n} \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \left(\frac{p}{1-p} \right)^k \left\{ \sum_{v=1}^k v \left[\frac{r(1-p)}{p(1-r)} \right]^v \sum_{m=v}^{n+v-k} S(m) \right\} \quad (4.66)$$

przy czym

$$S(m) = \begin{cases} 0 & \text{dla } m \geq 2 \\ n \binom{1}{v} \binom{n-1}{k-v} \frac{1-r}{1-p} f_0(y_k) & \text{dla } m = 1 \end{cases} \quad (4.67)$$

oraz

$$f(y_k, t) = \frac{(1-p)^n}{1-(1-p)^n} \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \left(\frac{p}{1-p}\right)^k \left\{ \sum_{v=1}^k T(v) \right\} \quad (4.68)$$

przy czym

$$T(v) = \begin{cases} 0 & \text{dla } v \geq 2 \\ n \binom{n-1}{k-1} \frac{r}{p} f_0(y_k) & \text{dla } v = 1 \end{cases} \quad (4.69)$$

Dokonując dalszych przekształceń wzoru (4.68) oraz uwzględniając to, że dla $y = y_k$, $\frac{r}{p} f_0(y_k) = \Xi_{y_k} [f_A(y_k, t)]$, otrzymamy

$$f(y_k, t) = \frac{n(1-p)^n}{1-(1-p)^n} \left[\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \binom{n-1}{k-1} \left(\frac{p}{1-p}\right)^k \right] \Xi_{y_k} [f_A(y_k, t)] \quad (4.70)$$

Ponieważ $p \rightarrow 1$ wynik powyższych rozważań można napisać w postaci

$$f(y_k, t) = \Xi_{y_k} [f_A(y_k, t)] \quad (4.71)$$

Jeżeli zależność (4.71) jest słuszna dla dowolnie wybranego $y = y_k$, to słuszna będzie również i dla każdej wartości poru, czyli

$$f(y, t) = \Xi_y [f_A(y, t)] \quad (4.72)$$

lub uwzględniając (4.30)

$$f(y, t) = \Xi_y [f_0(y) - f_B(y, t)] \quad (4.73)$$

Otrzymany ostatecznie rezultat wskazuje, że niezależnie od ilości porów przegrody filtracyjnej w całym zakresie wymiarów, ich rozkład opisany funkcją gęstości $f(y, t)$ jest zawsze taki sam, zależy tylko od $f_0(y)$, od czasu trwania procesu oraz od intensywności zatykania tych porów. Pojęcie intensywności zatykania porów będzie dalej sprecyzowane przy omawianiu własności przegrody filtracyjnej.

4.1.6 Intensywność dopływu cząstek zanieczyszczeń do przegrody filtracyjnej

W dalszym ciągu rozpatrzmy przegrodę filtracyjną, której promienie porów y_1, y_2, \dots, y_n są określoną realizacją układu zmien-

nych losowych Y_1, Y_2, \dots, Y_n . Funkcję gęstości $f(y, t)$ dla początku rozważanego procesu możemy zatem wyrazić jako granicę

$$f_0(y) = \frac{1}{n} \lim_{\Delta y \rightarrow 0^+} \frac{1}{\Delta y} \sum_{i=1}^n P \{y \leq Y_i < y + \Delta y\} \quad (4.74)$$

a gęstości defektywne zgodnie z podziałem określonym w (4.30) jako:

$$f_A(y, t) = \frac{1}{n} \lim_{\Delta y \rightarrow 0^+} \frac{1}{\Delta y} \sum_{i=1}^n P \{A_i[y, y + \Delta y]\} \quad (4.75)$$

$$f_B(y, t) = \frac{1}{n} \lim_{\Delta y \rightarrow 0^+} \frac{1}{\Delta y} \sum_{i=1}^n P \{B_i[y, y + \Delta y]\} \quad (4.76)$$

Symbole $A_i[y, y + \Delta y]$ i $B_i[y, y + \Delta y]$ oznaczają tutaj zdarzenie, polegające na tym, że wymiar i -tego poru y_i należy do przedziału $[y, y + \Delta y]$ i że po upływie czasu t od początku filtrowania por ten jest odpowiednio otwarty i zatkany.

Odpowiada to podziałowi rozkładu prawdopodobieństwa funkcji $f_0(y)$ na część dotyczącą porów otwartych i część dotyczącą porów zatkaných. Interpretacja fizyczna tego podziału wynika na podstawie (4.72) z następującej zależności

$$n(t) = n \int_0^{+\infty} f_A(y, t) dy \quad (4.77)$$

gdzie: $n(t)$ — wartość oczekiwana ilości porów otwartych po czasie t filtrowania.

W ten sposób funkcję $f(y, t)$ można nazwać *gęstością geometryczną przegrody filtracyjnej*, ponieważ określa rozkład wymiarów porów otwartych w dowolnym czasie t filtrowania.

Jeżeli symbolem $\lambda(y, t)$ oznaczymy proces stochastyczny wyrażający *intensywność dopływu do poru o promieniu y cząstek o promieniach $x > y$* , to będzie spełniona zależność

$$f_A(y, t) = f_0(y) E \{ \exp [- \Lambda(y, t)] \} \quad (4.78)$$

przy czym

$$\Lambda(y, t) = \int_0^t \lambda(y, \tau) d\tau \quad (4.79)$$

W celu wykazania słuszności tej zależności weźmy pod uwagę dowolną realizację ζ_i procesu $\lambda(y, t)$. Ponieważ zgodnie z przyję-

tym założeniem każda cząstka o przekroju większym od przekroju poru powoduje jego zatkanie, można napisać

$$\lambda(y, t; \zeta_i) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1 - P\{C_y(t, t + \Delta t) | \zeta_i\}}{\Delta t} \quad (4.80)$$

przy czym $C_y(t_1, t_2)$ oznacza zdatczenie polegające na tym, że por o promieniu y nie ulegnie zatkananiu w przedziale czasu $(t_1, t_2]$.

W założonych warunkach filtrowania koncentracja objętościowa cząstek w płynie jest tak mała, że $C_y(0, t]$ i $C_y(t, t + \Delta t]$ mogą być rozpatrywane jako zdarzenia niezależne. Zatem

$$P\{C_y(0, t + \Delta t) | \zeta_i\} = P\{C_y(0, t) | \zeta_i\} P\{C_y(t, t + \Delta t) | \zeta_i\} \quad (4.81)$$

Podstawiając (4.81) do (4.80), otrzymamy zależność

$$\lambda(y, t; \zeta_i) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P\{C_y(0, t) | \zeta_i\} - P\{C_y(0, t + \Delta t) | \zeta_i\}}{\Delta t \cdot P\{C_y(0, t) | \zeta_i\}} \quad (4.82)$$

którą można zapisać w postaci

$$\begin{aligned} & \lambda(y, t; \zeta_i) P\{C_y(0, t) | \zeta_i\} = \\ & = - \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P\{C_y(0, t + \Delta t) | \zeta_i\} - P\{C_y(0, t) | \zeta_i\}}{\Delta t} \end{aligned} \quad (4.83)$$

Z równania (4.83) otrzymujemy

$$\frac{\partial}{\partial t} P\{C_y(0, t) | \zeta_i\} + \lambda(y, t; \zeta_i) P\{C_y(0, t) | \zeta_i\} = 0 \quad (4.84)$$

przy warunku początkowym $P\{C_y(0, t) | \zeta_i\} = 1$ w chwili $t = 0$.

Stąd

$$P\{C_y(0, t) | \zeta_i\} = \exp\left[-\int_0^t \lambda(y, \tau; \zeta_i) d\tau\right] \quad (4.85)$$

czyli dla nieznannej realizacji procesu $\lambda(y, t)$ mamy

$$P\{C_y(0, t)\} = E\left\{\exp\left[-\int_0^t \lambda(y, \tau) d\tau\right]\right\} \quad (4.86)$$

Z oczywistej zależności

$$\lim_{\Delta y \rightarrow 0+} \frac{P\{X_i[y, y + \Delta y)\}}{\Delta y} = P\{C_y(0, t)\} \lim_{\Delta y \rightarrow 0+} \frac{P\{y \leq Y_i < y + \Delta y\}}{\Delta y} \quad (4.87)$$

oraz (4.74), (4.75) i (4.86) wynika (4.84).

Wprowadzimy teraz pojęcie *funkcji gęstości prawdopodobieństwa* $k(y, t)$ i jej *dystrybuanty* $K(y, t)$ charakteryzujących własno-

ści hydrodynamiczne przegrody filtracyjnej, a ściślej określających rozdzielanie natężenia przepływu płynu roboczego w zależności od wymiarów porów w odróżnieniu od funkcji gęstości geometrycznej $f(y, t)$ określającej rozdzielanie wymiarów porów przegrody.

Zgodnie z założeniem, że pory przegrody filtracyjnej mają kształt cylindryczny i są jednakowej długości, funkcja gęstości $k(y, t)$ — opisująca udział porów w danym promieniu y w przepływie płynu roboczego z cząstkami zanieczyszczeń przez przegrodę filtracyjną — przyjmie postać

$$k(y, t) = \Xi_y [y^{\kappa} f(y, t)] \quad (4.88)$$

przy czym wykładnik potęgi κ jest zależny od stanu przepływu płynu roboczego przez pory; dla najczęściej występującego w filtrach przepływu laminarnego, w którym natężenie przepływu jest proporcjonalne do kwadratu przekroju poru, κ jest równe 4.

Oznaczmy przez $u(x, y; t)$ funkcję gęstości łącznego rozkładu prawdopodobieństwa zmiennych losowych $X_g(t)$ i $Y_k(t)$, charakteryzującą prawdopodobieństwo natrafienia cząstki zanieczyszczenia o promieniu x na por przegrody filtracyjnej o promieniu y . Gęstość defektywną $g_A(x, t)$ otrzymamy całkując funkcję $u(x, y; t)$ względem y w przedziale, w którym $x > y$, czyli

$$g_A(x, t) = \int_x^{\infty} u(x, y; t) dy \quad (4.89)$$

natomiast gęstość defektywną $g_B(x, t)$ otrzymamy całkując funkcję $u(x, y; t)$ względem y w przedziale, dla którego $x \leq y$, czyli

$$g_B(x, t) = \int_0^x u(x, y; t) dy \quad (4.90)$$

W przyjętym modelu procesu filtrowania, każdej cząstce zanieczyszczeń znajdującej się w płynie roboczym przyporządkujemy niezależnie od jej wymiaru x jednakowe prawdopodobieństwo natrafienia na por określonego wymiaru y przegrody filtracyjnej. Wskutek tego zmienne losowe $X_g(t)$ i $Y_k(t)$ można rozpatrywać jako niezależne i stąd

$$u(x, y; t) = g(x, t) k(y, t) \quad (4.91)$$

Podstawiając (4.91) do (4.89) i do (4.90) otrzymujemy

$$g_A(x, t) = g(x, t) [1 - K(x, t)] \quad (4.92)$$

oraz

$$g_B(x, t) = g(x, t) K(x, t) \quad (4.93)$$

przy czym

$$K(x, t) = \int_0^x k(y, t) dy \quad (4.94)$$

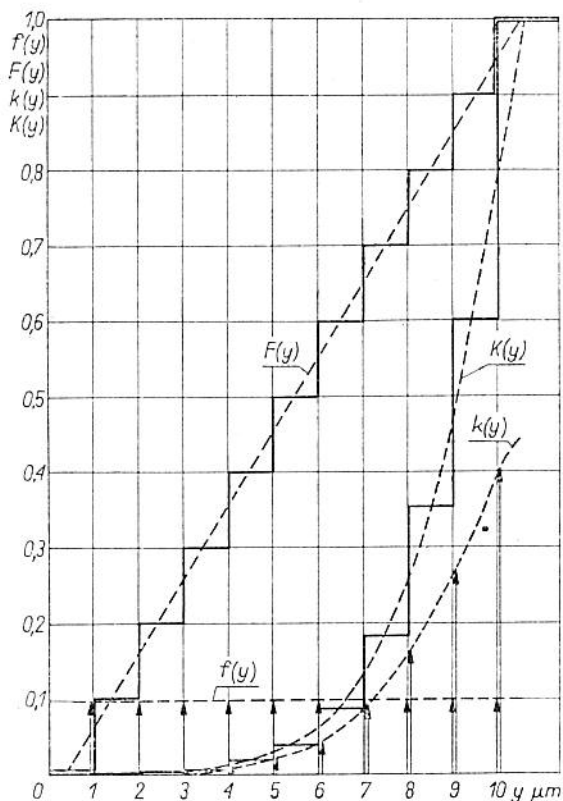
Z porównania zależności (4.92) i (4.93) oraz (4.26) i (4.27) wynika, że

$$e_f(x, t) = K(x, t) \quad (4.95)$$

oraz

$$e_p(x, t) = [1 - K(x, t)] \quad (4.96)$$

Otrzymany rezultat wskazuje na równoważność charakterystyki odfiltrowania z dystrubuantą hydrodynamiczną przegrody filtracyjnej. Wynik ten dowodzi możliwości wyznaczenia efektywności filtrowania przez badania jedynie tylko przegrody filtracyjnej.



Rys. 4.5. Interpretacja graficzna podstawowych funkcji określających własności filtracyjne przegrody porowatej

nej. Wykorzystanie zależności (4.95) lub (4.96) umożliwi również analityczne określenie efektywności filtrowania w znacznie większym stopniu niż wcześniej otrzymane wzory. Interpretację graficzną podstawowych funkcji określających własności filtracyjne przegrody porowatej zbudowanej z dziesięciu różnych porów przedstawiono na rys. 4.5.

Na podstawie wzorów (4.95) i (4.29) uzyskamy opis wiążący w znormalizowanej postaci elementy rozpatrywanego układu dynamicznego

$$h(x, t) = \Xi_x\{g(x, t)[1 - K(x, t)]\} \quad (4.97)$$

4.1.7. Przykłady wyznaczania charakterystyki odfiltrowania filtrów cieczy

Przykład wyznaczania charakterystyki odfiltrowania dla deterministycznych parametrów procesu filtrowania. Przyjmijmy, że spadek ciśnienia na przegrodzie filtrującej $p(t)$, koncentracja cząstek w płynie $z(t)$, gęstość rozkładu prawdopodobieństwa wielkości cząstek przed filtrowaniem $g(x, t)$, lepkość płynu $\eta(t)$ będą przebiegami deterministycznymi i dla takiego założenia wyznaczmy charakterystykę odfiltrowania $e_f(x, t)$.

W zakresie spadku ciśnienia na przegrodzie filtracyjnej, w którym przepływ przez por jest laminarny można napisać

$$q(y, t) = \alpha y^4 \frac{p(t)}{\eta(t)} \quad (4.98)$$

gdzie: $g(y, t)$ natężenie przepływu płynu przez por o promieniu y, α — stała.

Dla warunków początkowych

$$q(y, t)|_{t=0} = q_0(y); \quad p(t)|_{t=0} = p_0; \quad \eta(t)|_{t=0} = \eta_0 \quad (4.99)$$

otrzymujemy

$$q_0(y) = \alpha y^4 \frac{p_0}{\eta_0} \quad (4.100)$$

Dla poru o nieznanym wymiarze y wartość oczekiwana $q_0(y)$ ma postać

$$E\{q_0\} = \alpha \frac{p_0}{\eta_0} \quad (4.101)$$

$$K_0 = \int_0^{\infty} y^4 f_0(y) dy \quad (4.102)$$

Ponieważ ilość porów przegrody filtrującej jest bardzo duża można przyjąć, że całkowite natężenie przepływu przez przegrodę Q_0 dla $t = 0$ będzie

$$Q_0 = nE\{q_0\} \quad (4.103)$$

Zatem

$$\alpha = \frac{Q_0 \eta_0}{n p_0 K_0} \quad (4.104)$$

i stąd

$$q(y, t) = \frac{Q_0 y^4}{n K_0} \frac{p(t)}{p_0} \frac{\eta_0}{\eta(t)} \quad (4.105)$$

Koncentracja ilościowa $z(x > y; t)$ cząstek o wymiarze $x > y$ jest równa

$$z(x > y; t) = z(t) [1 - G(y, t)] \quad (4.106)$$

$$G(y, t) = \int_0^y g(x, t) dx \quad (4.107)$$

Intensywność dopływu cząstek o promieniach x większych od promienia poru y ma zatem postać

$$\lambda(y, t) = \frac{Q_0 y^4 \eta_0}{n p_0 K_0} \frac{p(t) z(t)}{\eta(t)} [1 - G(y, t)] \quad (4.108)$$

Ze względu na deterministyczny charakter przebiegu $\lambda(y, t)$ można zapisać, że

$$E\{\exp[-\Lambda(y, t)]\} = \exp[-\Lambda(y, t)] \quad (4.109)$$

Zatem charakterystyka odfiltrowania dla tego przypadku przyjmie postać

$$e_f(x, t) = \int_0^x \Xi_y \left(k_0(y) \exp \left\{ - \frac{Q_0 y^4 \eta_0}{n p_0 K_0} \int_0^t \frac{p(\tau) z(\tau)}{\eta(\tau)} [1 - G(y, \tau)] d\tau \right\} \right) dy \quad (4.110)$$

Przykład wyznaczenia charakterystyki odfiltrowania dla stochastycznego przebiegu spadku ciśnienia na przegrodzie filtracyjnej. Rozpatrzmy postać $e_f(x, t)$ dla przypadku filtrowania cieczy, w którym $z(t) = z_0$, $g(x, t) = g_0(x)$, $\eta(t) = \eta_0$, a przebieg spadku ciśnienia cieczy na przegrodzie filtracyjnej $p(t)$ jest procesem stochastycznym $P(t)$.

Przy tych założeniach otrzymamy

$$e_f(x, t) = \int_0^x \Xi_y(k_0(y) E \{ \exp [-a(y) S(t)] \}) dy \quad (4.111)$$

przy czym

$$a(y) = \frac{Q_0 y^4}{nK_0} [1 - G_0(y)]; G_0(y) = \int_0^y g_0(x) dx \quad (4.112)$$

$$S(t) = \int_0^t P(\tau) d\tau \quad (4.113)$$

Wprowadzając oznaczenia całki stochastycznej $S(t)$: $f_s(s, t)$ — funkcja prawdopodobieństwa, $m(t)$ — wartość średnia, $\mu_k(t)$ — k -ty moment centralny oraz dla procesu $P(t)$: $\xi(t)$ — wartość średnia, $C(t_1, t_2)$ autokowariancja, można napisać

$$E \{ \exp [-a(y) S(t)] \} = \int_0^\infty f_s(s, t) \exp [-a(y) s] ds \quad (4.114)$$

Zastępując w tym wyrażeniu funkcję $\exp [-a(y)s]$ jej rozwinięciem w szereg Taylora względem zmiennej s w otoczeniu punktu $m(t)$ otrzymujemy

$$\begin{aligned} & E \{ \exp [-a(y) S(t)] \} = \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{[-a(y)]^k}{k!} \exp [-a(y) m(t)] \int_0^\infty [s - m(t)]^k f_s(s, t) ds = \\ &= \left\{ 1 + \sum_{k=1}^{\infty} [-a(y)]^k \frac{\mu_k(t)}{k!} \right\} \exp [-a(y) m(t)] \end{aligned} \quad (4.115)$$

i stąd (moment μ_1 jest równy zeru)

$$e_f(x, t) = \int_0^x \Xi_y \left(k_0 \left\{ 1 + \sum_{k=2}^{\infty} [-a(y)]^k \frac{\mu_k(t)}{k!} \right\} \exp [-a(y) m(t)] \right) dy \quad (4.116)$$

Jeżeli

$$1 + [a(y)]^2 \frac{\mu_2(t)}{2} \gg \sum_{k=3}^{\infty} [-a(y)]^k \frac{\mu_k(t)}{k!} \quad (4.117)$$

wówczas można wzór (4.116) zastąpić prostszym wyrażeniem

$$e_f(x, t) = \int_0^x \Xi_y \left(k_0(y) \left\{ 1 + \frac{[a(y)]^2 \mu_2(t)}{2} \right\} \exp[-a(y)m(t)] \right) dy \quad (4.118)$$

Wartość średnia $m(t)$ i wariancja $\mu_2(t)$ całki stochastycznej $S(t)$ są równe

$$m(t) = \int_0^t \xi(\tau) d\tau \quad (4.119)$$

$$\mu_2(t) = \int_0^t \int_0^t C(t_1, t_2) dt_1 dt_2 \quad (4.120)$$

a gdy proces $P(t)$ jest stacjonarny, to

$$m(t) = \xi t \quad (4.121)$$

$$\mu_2(t) = 2t \int_0^t \left(1 - \frac{\tau}{t} \right) C(\tau) d\tau \quad (4.122)$$

Interpretacja charakterystyki odfiltrowania. Opierając się na wzorach definicyjnych (4.22) i (4.24) można napisać, że charakterystyka odfiltrowania $e_f(x, t)$ wyraża stosunek ilości cząstek zanieczyszczeń określonego wymiaru x zatrzymanych w danym czasie filtrowania na przegrodzie filtracyjnej $g_B(x, t)$ do ilości cząstek $g(x, t)$ zawartych w pewnej stałej objętości przed filtrowaniem. Ze względu na ograniczone możliwości pomiaru ilości i wymiarów cząstek, zmienną x należy uważać za skończony przedział wymiarowy, w którym jest dokonywane liczenie cząstek. Również podobnie można postąpić przy określaniu wymiarów porów. Parametr t należy rozumieć jako określoną chwilę czasu t_n , w której następuje przefiltrowanie pewnej objętości płynu. W takim rozumieniu $e_f(x, t_n)$ jest *charakterystyką statyczną odfiltrowania*. *Charakterystykę dynamiczną odfiltrowania* będzie określać rodzina krzywych dla następujących kolejno po sobie chwil czasowych t_n .

Charakterystyka odfiltrowania może być również wyrażona przez wielkości hydrodynamiczne przegrody porowatej. W przypadku stałego ciśnienia filtracji, charakterystyka odfiltrowania będzie określona stosunkiem natężenia przepływu przez pory przegrody po przefiltrowaniu do natężenia przepływu przed przefiltrowaniem tej samej objętości płynu. Zmiany natężenia przepływu zawierają w sobie informację czy określony por o wymiarze y po przefiltrowaniu pewnej objętości płynu jest niezatkany i czy może

przepuszczać cząstki zanieczyszczeń o wymiarach $x < y$. Ze względu na różne wymiary cząstek w strumieniach płynu przepływającego przez pory oraz różne wymiary tych porów (występujących w przegrodzie filtracyjnej), proces zatrzymywania cząstek jest procesem losowym (stochastycznym). Obserwacja zmian natężenia przepływu jest obserwacją skutków tylko określonej realizacji tego procesu. Przeprowadzone rozważania umożliwiły wykazanie najbardziej prawdopodobnej realizacji charakterystyki odfiltrowania.

Rozpatrywany układ dynamiczny może być uważany, ze względu na procesy losowe towarzyszące zmianie „stanu” układu, za przykład procesu Markowa, który spełnia warunki procesu Poissona. Oznacza to w rzeczywistości, że znajomość „stanu” układu, a więc charakterystyki odfiltrowania w danej chwili czasu oraz poprzednich jej przebiegów, nie określa w sposób jednoznaczny jej przyszły przebieg. Jeżeli natomiast nadamy procesowi filtrowania sens deterministyczny, to uzyskane wyniki jednoznacznie określają kolejne przebiegi charakterystyk odfiltrowania. Wymagania, które czynią zadość deterministycznej charakterystyce odfiltrowania, są spełnione z dużą dokładnością w najczęściej występujących przypadkach procesu filtrowania cieczy i gazów roboczych w układach płynowych.

Otrzymane rezultaty wiążące charakterystykę odfiltrowania z własnościami geometrycznymi i hydrodynamicznymi przegrody porowatej, wskazują na możliwość analizy zarówno prostych jak i złożonych przypadków procesu filtrowania niezależnie od tego, czy parametry określające proces filtrowania mają charakter deterministyczny czy też stochastyczny.

Wyjaśnimy jeszcze wynik zapisany wzorem (4.17). Jest on identyczny z wynikami analizy procesu filtrowania, uzyskanymi przy zastosowaniu metod statystycznych. Istotnie, wzór (4.17) ma taką samą postać jak wzór (4.95) w chwili $t = 0$, przy założeniu stałego przepływu płynu przez wszystkie pory materiału filtracyjnego. Również wzory (4.110) i (4.116), określające własności dynamiczne charakterystyki odfiltrowania, można sprowadzić do postaci (4.17) przez podstawienie $t = 0$. Mamy bowiem ze wzoru (4.110)

$$\begin{aligned}
 e_f(x, 0) &= \int_0^x \varepsilon_y[k_0(y)] dy = \int_0^x \frac{k_0(y)}{\int_{-\infty}^{+\infty} k_0(y) dy} dy = \\
 &= \int_0^x k_0(y) dy
 \end{aligned}
 \tag{4.123}$$

ponieważ $k_0(y)$ jest funkcją gęstości, a zatem

$$\int_{-\infty}^{+\infty} k_0(y) dy = 1 \quad (4.124)$$

Należy podkreślić, że przybliżona postać charakterystyki odfiltrowania określona wzorem (4.17), wynika z przyjęcia jednakowego przepływu przez wszystkie pory przegrody filtracyjnej i założenia deterministycznego charakteru procesu filtrowania. Pierwsze uproszczenie zostało we wzorze (4.95) wyeliminowane przez zastąpienie dystrybuanty geometrycznej, dystrybuantą hydrodynamiczną przegrody porowatej. Należy dodać, że wynik (4.95) przy zastosowaniu metody statystycznej jest implikacją przyjęcia hipotezy o niezależności zmiennych losowych występowania cząstek zanieczyszczeń określonego wymiaru w płynie i natrafienia cząstki na por o określonym wymiarze. W praktyce zaobserwowano dużą zgodność wyników doświadczeń z obliczeniami wykorzystującymi podstawową zależność (4.95).

4.2. Wyznaczanie efektywności filtrowania przy użyciu szyn matematycznych

4.2.1. Modelowanie analogowe

Wyprowadzone uprzednio zależności analityczne umożliwiają wyznaczenie efektywności filtrowania, a przede wszystkim wyznaczenie charakterystyki odfiltrowania przy użyciu maszyn matematycznych. Możliwe jest stosowanie techniki obliczeń cyfrowych, jak również techniki modelowania analogowego. Należy zaznaczyć, że wyznaczenie efektywności filtrowania przy użyciu maszyn cyfrowych oprócz wielu zalet ogólnie znanych ma wiele wad, do których należą trudności wprowadzania zmian parametrów modelowanego problemu i bezpośredniej obserwacji ich wpływu na wyniki rozwiązania oraz na ogół konieczność współpracy ze specjalistycznym ośrodkiem obliczeniowym. Modelowanie analogowe oprócz ograniczenia dokładności uzyskiwanych wyników wykazuje wiele zalet, do których głównie można zaliczyć stosunkowo szybkie uzyskanie wyników, możliwość bezpośredniej obserwacji wyników rozwiązania i znaczną „elastyczność” w wyborze metody modelowania przy użyciu typowego zestawu członów maszyny analogowej. Nie wnikając głębiej w zagadnienia techniczne obu wymienionych metod rozwiązania, należy podkreślić celowość ich stosowania przy wyznaczeniu efektywności filtrowania nie tylko ze

względem na szybkość uzyskania wyników, lecz także ze względu na możliwość rozwiązywania problemów bardziej skomplikowanych.

Przedstawione niżej wyniki obliczeń efektywności filtrowania przy użyciu iteracyjnej maszyny analogowej oraz maszyny cyfrowej są próbą wykorzystania techniki maszyn matematycznych do obliczeń opierających się na wyprowadzonych zależnościach analitycznych efektywności filtrowania.

Wyprowadzona uprzednio zależność (4.110) posłuży na przykładzie przegrody filtracyjnej metalowego filtra spiekane do wyznaczenia przy użyciu iteracyjnej maszyny analogowej wyrażenia o postaci

$$k_A(y, t) = k_0(y) \exp \left\{ - \frac{Q_0 z_0}{n A_0} y^4 [1 - G_0(y)] t \right\} \quad (4.125)$$

Wzór (4.125), określający defektywną gęstość hydrodynamiczną przegrody filtracyjnej, dotyczy porów otwartych i wyraża analitycznie charakter ich zmian w czasie filtrowania. Wzór ten jest powiązany z charakterystyką odfiltrowania następującą relacją

$$e_f(x, t) = \int_0^x \varepsilon_y k_A(y, t) dy \quad (4.126)$$

Tak więc obliczenie $k_A(y, t)$ daje pełną informację o charakterystyce odfiltrowania, którą można wyznaczyć na podstawie zależności (4.125) dokonując operacji normalizacyjnej zgodnie ze wzorem (4.126).

Na podstawie badań laboratoryjnych uzyskano następujące dane wyjściowe:

a) Przy użyciu porometru laboratoryjnego wyznaczono gęstość hydrodynamiczną kilku próbek filtrów spiekanych, które aproksymowano typowymi funkcjami rozkładu Rayleigha (rys. 4.6a)

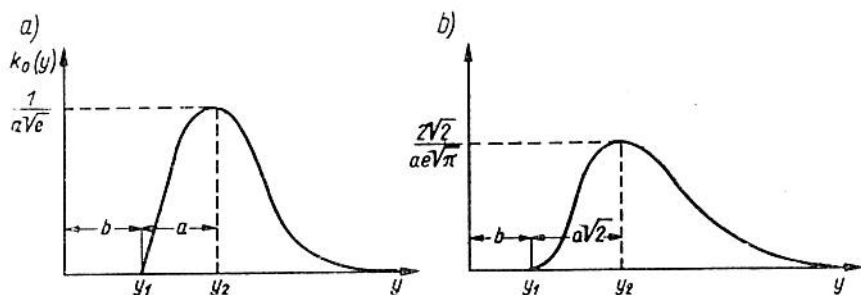
$$k_0(y) = \begin{cases} 0 & \text{dla } y < b \\ \frac{y-b}{a^2} \exp \left[- \frac{(y-b)^2}{2a^2} \right] & \text{dla } y \geq b \end{cases} \quad (4.127)$$

gdzie $a = y_2 - y_1$ $b = y_1$
i rozkładu Maxwella (rys. 4.6b)

$$k_0(y) = \begin{cases} 0 & \text{dla } y < b \\ \frac{1}{a^3} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{(y-b)^2}{\pi} \exp \left[- \frac{(y-b)^2}{2a^2} \right] & \text{dla } y \geq b \end{cases} \quad (4.128)$$

gdzie $a \sqrt{2} = y_2 - y_1$ $b = y_1$.

Wybraną do badań sprawdzających i modelowania przegrodę filtracyjną opisaną funkcją gęstości Maxwella dla $a = 2 \mu\text{m}$ i $b = 1 \mu\text{m}$.



Rys. 4.6. Przykład aproksymacji rozkładu porów: a) rozkład Rayleigha, b) rozkład Maxwella

b) Próbką filtru o powierzchni 2 cm^2 miała w przybliżeniu liczbę porów $n = 10^7$.

c) Przy użyciu metod mikroskopowych wyznaczono koncentrację z_0 cząstek zanieczyszczeń w cieczy roboczej przefiltrowanej uprzednio przez filtr dokładny o nominalnej dokładności $15 \mu\text{m}$, $z_0 = 6 \cdot 10^4/100 \text{ ml}$.

d) Rozkład wymiarowy cząstek zanieczyszczeń aproksymowano wykładniczą funkcją gęstości o następującej postaci

$$g_0(x) = \begin{cases} 0 & \text{dla } x \leq 0 \\ 0,6 \exp(-0,6x) & \text{dla } x > 0 \end{cases} \quad (4.129)$$

e) Obliczono wartość $A_0 = 90$ występującą w zależności

$$k_0(y) = \frac{y^4 f_0(y)}{A_0} = \frac{k_n(y)}{A_0} \quad (4.130)$$

przy czym

$$A_0 = \int_0^{\infty} y^4 f_0(y) dy = \int_0^{\infty} k_n(y) dy \quad (4.131)$$

gdzie $k_n(y)$ — funkcja rozkładu hydrodynamicznego przegrody filtracyjnej uzyskana na podstawie doświadczeń.

Występujące w równaniu (4.125) wyrażenie

$$y^4 [1 - G_0(y)] = \varepsilon_0(y) \quad (4.132)$$

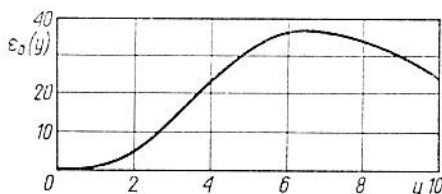
można zapisać po uwzględnieniu (4.129) i

$$G_0(y) \int_0^y g_0(x) dx = 1 - \exp(-0.6y) \quad (4.133)$$

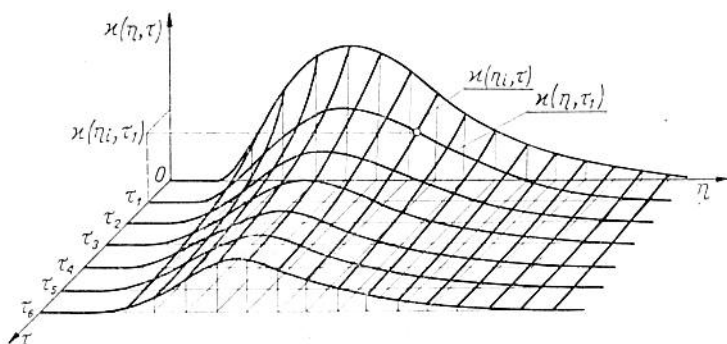
w postaci

$$\varepsilon_0(y) = y^4 \exp(-0.6y) \quad (4.134)$$

Przebieg krzywej $\varepsilon_0(y)$ ilustruje rys. 4.7.



Rys. 4.7. Przebieg krzywej pomocniczej $\varepsilon_0(y)$ do modelowania analogowego



Rys. 4.8. Kształt powierzchni określającej proces filtrowania

Uwzględniając wszystkie założenia i dane wyjściowe przyjęte w tym przykładzie oraz zmienne maszynowe i współczynniki skali otrzymujemy do rozwiązania (4.125) równanie maszynowe następującej postaci, którego przybliżony kształt powierzchni przedstawiono na rys. 4.8:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} x(\eta, \tau) = -\alpha_0(\eta) x(\eta, \tau) \quad (4.135)$$

Równanie to uzyskano dokonując następujących podstawień

$$y = M_y \eta, \quad t = M_t \tau \quad (4.136)$$

oraz

$$k_a(M_y \eta, M_t \tau) = M_k \kappa(\eta, \tau) \quad (4.137)$$

$$k_0(M_y \eta) = M_k \kappa_0(\eta) \quad (4.138)$$

$$\varepsilon_0(M_y \eta) = M_\varepsilon \varepsilon_0(\eta) \quad (4.139)$$

odwzorowujących wielkości zmienne w postaci napięcia

$$M_y = 1 \mu\text{m/V}, M_t = A_0 n / Q_0 z_0 \text{ s}^{-1}, M_\varepsilon = 1 \text{V}^{-1} \quad (4.140)$$

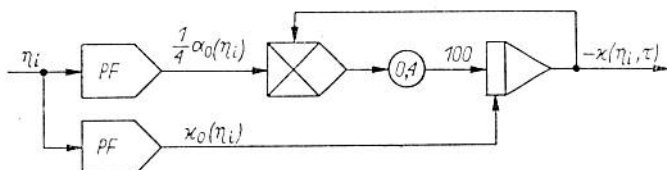
przy warunku początkowym

$$\kappa(\eta, \tau)_{\tau=0} = \kappa_0(\eta) \quad (4.141)$$

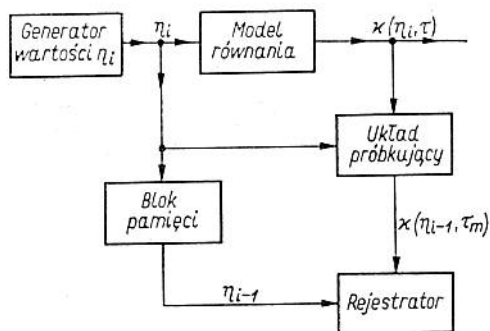
Równanie (4.135) odpowiada szczególnemu przypadkowi wyprowadzonego równania ogólnego (4.84), które w postaci

$$\frac{\partial}{\partial t} k_A(y, t) + \frac{Q_0 z_0}{n A_0} \varepsilon_0(y) k_A(y, t) = 0 \quad (4.142)$$

przy warunku początkowym $k_A(y, t)|_{t=0} = k_0(y)$ daje rozwiązanie funkcji $k_A(y, t)$ przedstawionej zależnością (4.125).



Rys. 4.9. Schemat blokowy modelu analogowego równania określającego proces filtrowania



Rys. 4.10. Schemat układu modelowania analogowego

Modelowania dokonano przy użyciu maszyny analogowej EMAT-30 w Instytucie Cybernetyki Stosowanej PAN. Rozwiązanie równania (4.135), którego schemat modelowy przedstawiono na rys. 4.9, przeprowadzono stosując kwantyzację czasu przez wyznaczenie rodziny krzywych określonych równaniem

$$-\frac{\partial}{\partial \tau} z(\eta, \tau) \Big|_{\tau=\tau_m} + \alpha_0(\eta) z(\eta, \tau_m) = 0 \quad (4.143)$$

dla $\tau_0 = 0$, $\tau_1 = \Delta\tau$, $\tau_2 = 2\Delta\tau$, ..., (rys. 4.10), przy czym sam model równania umożliwił obliczenie $z(\eta, \tau)$ dla skwantowanej zmiennej η zgodnie z równaniem

$$\frac{\partial}{\partial \tau} z(\eta_i, \tau) + \alpha_0(\eta_i) z(\eta_i, \tau) = 0 \quad (4.144)$$

przy warunku początkowym $z(\eta_i, \tau) \Big|_{\tau=0} = z_0(\eta_i)$

W przypadku rozważanego zagadnienia bardziej jest przydatne jednak rozwiązanie równania przy zastosowaniu kwantyzacji czasu. W celu wyznaczenia takiej rodziny zastosowano układ (rys. 4.11), w którym krzywą tę uzyskuje się na podstawie modelu równania. Działanie układu jest następujące. Przebieg generowanego na wyjściu bloku I napięcia $U_I(t)$ ma kształt funkcji schodkowej (rys. 4.12). Uzyskiwane w okresach liczenia przez maszynę wartości stałe η_i ($i = 1, 2, 3 \dots, k$) tego napięcia są podawane jako kolejne skwantowane wartości zmiennej η na wejściu modelu oraz przez blok II i III z opróżnieniem na jedno z wejść kondensatora VIII.

Gdy napięcie $U_{III}(t)$ przekracza wartość 10 V, komparator VIII powoduje spadek napięcia $U_I(t)$ do zera, po czym cykl jego narastania powtarza się. Okres czasu w którym zmienna η przybiera kolejne wartości η_i , od η_1 do η_k ($\eta_k > 10$ V), będziemy nazywać cyklem zmiennej η .

W przedziałach czasu, w których $U_{III}(t) > 10$ V, przekaźnik R_1 jest w stanie czynnym. W okresach tych mieści się jeden całkowity okres liczenia maszyny (rys. 4.12) i w czasie jego trwania następuje przyrost napięcia $U_{IV}(t)$ o wartość

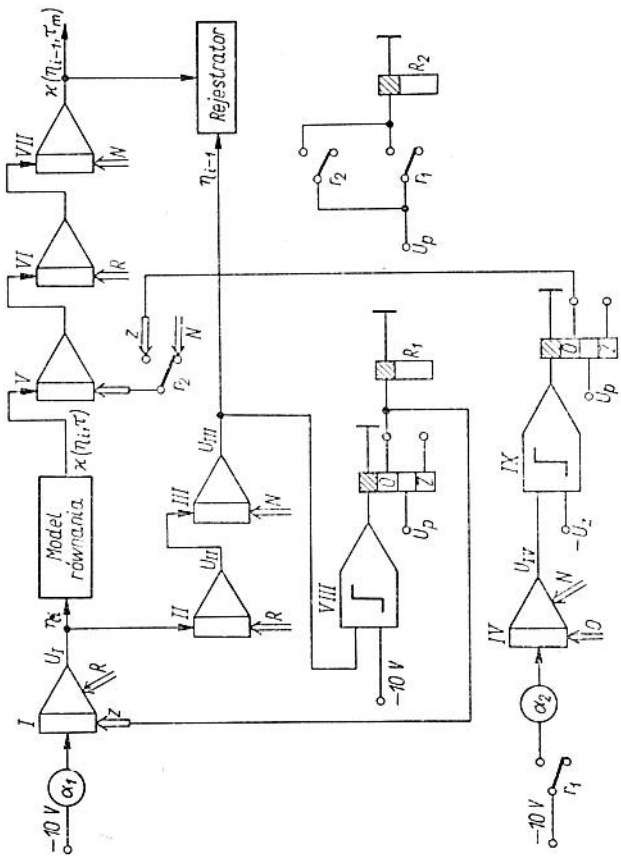
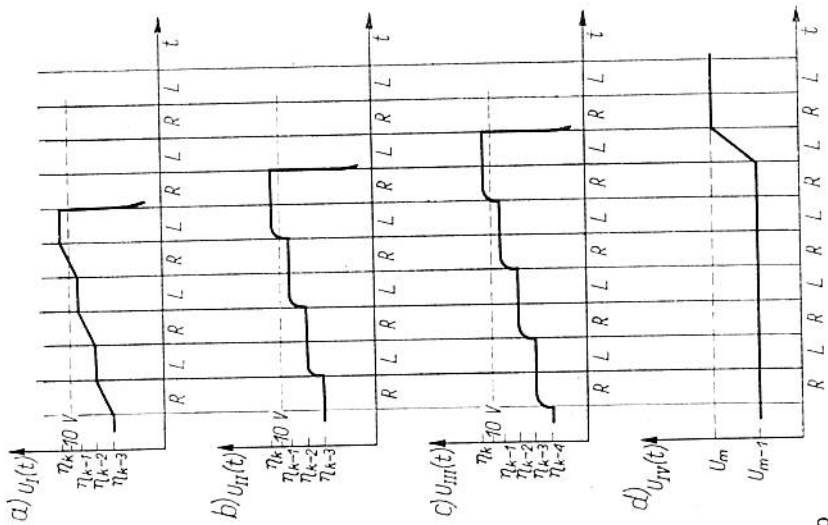
$$\Delta U_{IV} = U_m - U_{m-1} \quad (4.145)$$

Przyrost ten jest po każdym cyklu zmiennej taki sam, tak że napięcie $U_{IV}(t)$ w okresach między kolejnymi przyrostami może być wyrażone w postaci

$$U_{IV}(t) = U_m = m \cdot \Delta U_{IV} \quad (4.146)$$

gdzie m — liczba ukończonych cykli zmiennej η .

W pierwszym cyklu zmiennej η przekaźnik R_2 jest zwolniony. Blok V jest wtedy normalnym członem pamięci i jest przełączany



Rys. 4.11. Szczegółowy schemat układu modelowania analogowego

Rys. 4.12. Działanie układu modelowania analogowego

z operacji śledzenia na pamiętanie w chwilach $\tau = \tau_0 = 0$ czasu maszynowego.

W drugim i następnych cyklach zmiennej η przełącznik R_2 jest w stanie czynnym. Blok V jest wtedy sterowany komparatorem IX i jest przełączony z operacji śledzenia na pamiętanie w chwilach $\tau = \tau_m$, w których wzrastające liniowo napięcie

$$U_z(\tau) = a_z \tau \quad (4.147)$$

przekracza wartość U_m . Ze wzorów (4.73) i (4.74) wynika, że

$$\tau_m = m \cdot \Delta \tau \quad (4.148)$$

przy czym

$$\Delta \tau = \Delta U_{IV} / a_z \quad (4.149)$$

Dla każdej kolejnej wartości η_i mamy na wejściu bloku V przebieg $z(\eta_i, \tau)$, który w przypadku modelu opisanego równaniem (4.144) ma postać

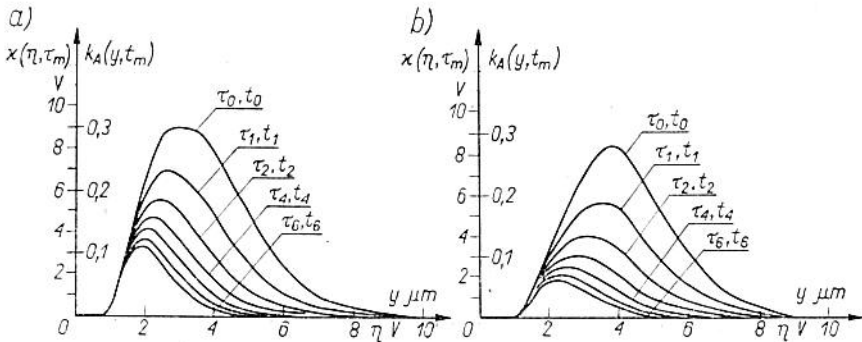
$$z(\eta_i, \tau) = z_0(\eta_i) \exp[-\alpha_0(\eta_i) \tau] \quad (4.150)$$

Blok V śledzi każdy z przebiegów (4.150) do chwili $\tau = \tau_m$, po czym zapamiętuje jego wartość chwilową $z(\eta_i, \tau_m)$.

Wartości stałe, które przybierają napięcie $U_{III}(t)$ i $U_{VII}(t)$ w kolejnych okresach liczenia maszyny, są następującymi parami liczb

$$[\eta_i; z(\eta_i, \tau_0)], [\eta_2; z(\eta_2, \tau_0)], \dots, [\eta_k; z(\eta_k, \tau_0)], [\eta_1; z(\eta_1, \tau_1)], [\eta_2; z(\eta_2, \tau_1)], \dots, [\eta_k; z(\eta_k, \tau_1)], [\eta_1; z(\eta_1, \tau_2)], \dots$$

W wyniku wykorzystania tych napięć jako sygnałów odchylenia poziomego i pionowego rejestratora zostają więc w kolejnych cyklach zmiennej η wykreślone (gdy skoki $\Delta \eta = \eta_i - \eta_{i-1}$ są dostatecznie małe) krzywe $z(\eta, \tau_0)$, $z(\eta, \tau_1)$, $z(\eta, \tau_2)$, ...



Rys. 4.13. Wyniki modelowania dla dwu filtrów: a) opisanego funkcją Rayleigha, b) opisanego funkcją Maxwella

Wyniki modelowania w postaci rodziny krzywych dla sześciu wartości czasu filtrowania przedstawiono na rys. 4.13, na którym kolejne krzywe odnoszące się do czasu maszynowego różnią się o $\Delta\tau = 20$ ms. Uwzględniając skalę czasu otrzymamy

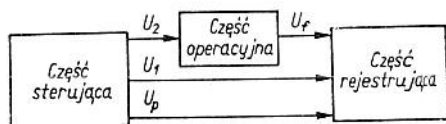
$$\Delta t = M_i \Delta\tau = 20 \cdot 10^{-3} \frac{nA_0}{z_0 Q_0} \quad (4.151)$$

stąd

$$t_m = m \Delta t = \frac{18 m}{z_0 Q_0} 10^{10} \quad (4.152)$$

gdzie $m = 0, 1, \dots, 6$.

Charakterystykę odfiltrowania $e_f(x, t)$ można wyznaczyć przy użyciu techniki analogowej w układzie przedstawionym na rys. 4.14 będącym uogólnieniem schematu z rys. 4.9. Dokonano w nim



Rys. 4.14. Schemat ogólny układu modelowania analogowego zagadnień filtrowania

podziału bloków maszyny analogowej na trzy części: sterującą, operacyjną i rejestrującą. *Część sterująca* w takim układzie wytwarza sygnały reprezentujące w krokach obliczeniowych kolejne wartości y od 0 do y_{max} (sygnał U_1), zadające wartości początkowe, a więc reprezentujące funkcję $k_0(y)$ (sygnał U_2), oraz sterujące próbkowaniem sygnału U_f w taki sposób, aby próbkowanie zachodziło w chwili t_i czasu rzeczywistego, w którym chcemy wyznaczyć charakterystykę odfiltrowania (sygnał U_p). *Część operacyjna* zawiera w sobie model równania procesu filtrowania i wytwarza sygnał U_f reprezentujący przebieg funkcji $k_A(y, t) = k_0(y) \exp[-\Delta(t)]$ dla kolejnych wartości y w taki sposób, że generowana funkcja czasu ma ciągły przebieg, a tylko próbkowanie następuje w odpowiednich dla nas chwilach czasowych. *Część rejestrująca* wyznacza na podstawie uzyskanych wartości $k_A(y, t_i)$ przebieg krzywych charakterystyki odfiltrowania $e_f(x, t)$.

4.2.2. Wyznaczanie zmian charakterystyki odfiltrowania przy użyciu maszyny cyfrowej

Wyznaczenie charakterystyki odfiltrowania przy użyciu maszyny cyfrowej wymaga współpracy z ośrodkiem obliczeniowym na dwu etapach. Na etapie sformułowania zagadnienia jest wymaga-

ne przedstawienie zasad teoretycznych, danych uzyskanych z rozwiązań i doświadczeń laboratoryjnych oraz wyselekcjonowanie niezbędnych założeń do rozwiązania. Na etapie przystosowania zagadnienia do maszyny cyfrowej jest wymagane uzgodnienie toku obliczeń i postaci wyników oraz adaptacji danych do obliczeń numerycznych w postaci łatwej do zrealizowania na maszynie.

Następne etapy obliczenia, a mianowicie kodowanie, uruchomienie i obsługa programu są wykonywane wyłącznie przez ośrodek obliczeniowy.

Do wyznaczenia zmiany charakterystyki odfiltrowania $e_f(x, t)$ wybrano przegrodę filtracyjną, której gęstość hydrodynamiczną można aproksymować rozkładem Rayleigha (rys. 4.6). Średnice porów badanej przegrody zawarte były w zakresie od ok. 5 do 50 μm ($a = 16 \mu\text{m}$, $b = 5 \mu\text{m}$). Zadaniem było wyznaczenie charakterystyki odfiltrowania o następującej postaci

$$e_f(x, t) = \int_0^x \Xi_y \{k_0(y) \exp[-a\varepsilon_0(y)]\} dy \quad (4.153)$$

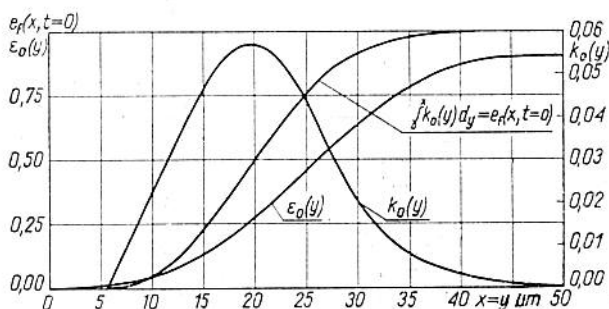
przy czym

$$a = \frac{Q_0 z_0}{nA_0} t \quad (4.154)$$

oraz

$$\varepsilon_0(y) = y^4 [1 - G_0(y)] \quad (4.155)$$

Przyjęto, że charakterystyka odfiltrowania $e_f(x, t)$ w chwili $t = 0$ jest określana zależnością przedstawioną na rys. 4.15, jako dystrybutanta gęstości hydrodynamicznej $k_0(y)$, natomiast $\varepsilon_0(y)$ jest



Rys. 4.15. Dane wyjściowe do obliczeń cyfrowych

Tablica 4.1. Wartości charakterystyk odfiltrowania $e_f(x, t)$ obliczonych wg wzoru (4.153) i wykreślonych na rys. 4.16 przy

$$a = \frac{Q_0 z_0 \cdot 10^5}{2,23 n} t$$

x μm	$e_f(x, t)$		
	a = 0,0000	a = 0,0010	a = 0,0050
5,000	0,000000	0,000000	0,000000
10,000	0,047169	0,047183	0,047237
15,000	0,219186	0,219239	0,219453
20,000	0,485494	0,485582	0,485934
25,000	0,747169	0,747245	0,747551
30,000	0,904165	0,904207	0,904374
35,000	0,965793	0,965811	0,965883
40,000	0,980518	0,989524	0,989548
45,000	0,998315	0,998316	0,998320
50,000	1,000000	1,000000	1,000000
	a = 0,0100	a = 0,0500	a = 0,1000
5,000	0,000000	0,000000	0,000000
10,000	0,047306	0,047856	0,048547
15,000	0,219721	0,221864	0,224550
20,000	0,486374	0,489890	0,494277
25,000	0,747933	0,750975	0,754743
30,000	0,904582	0,906237	0,908274
35,000	0,965973	0,966686	0,967560
40,000	0,989578	0,989814	0,990103
45,000	0,998325	0,998364	0,998411
50,000	1,000000	1,000000	1,000000
	a = 0,20000	a = 0,30000	a = 0,40000
5,000	0,000000	0,000000	0,000000
10,000	0,049942	0,051354	0,052782
15,000	0,229941	0,235356	0,240793
20,000	0,503016	0,511706	0,520324
25,000	0,762166	0,769436	0,776551
30,000	0,912242	0,916071	0,919765
35,000	0,969250	0,970864	0,972406
40,000	0,990660	0,991190	0,991693
45,000	0,998503	0,998589	0,998672
50,000	1,000000	1,000000	1,000000
	a = 0,50000	a = 0,60000	a = 0,70000
5,000	0,000000	0,000000	0,000000
10,000	0,054226	0,055685	0,057158
15,000	0,246250	0,251723	0,257209
20,000	0,528921	0,537439	0,545891
25,000	0,783512	0,790318	0,796969
30,000	0,923325	0,926755	0,930057
35,000	0,973877	0,975281	0,976619
40,000	0,992172	0,992625	0,993056
45,000	0,998750	0,998823	0,998893
50,000	1,000000	1,000000	1,000000

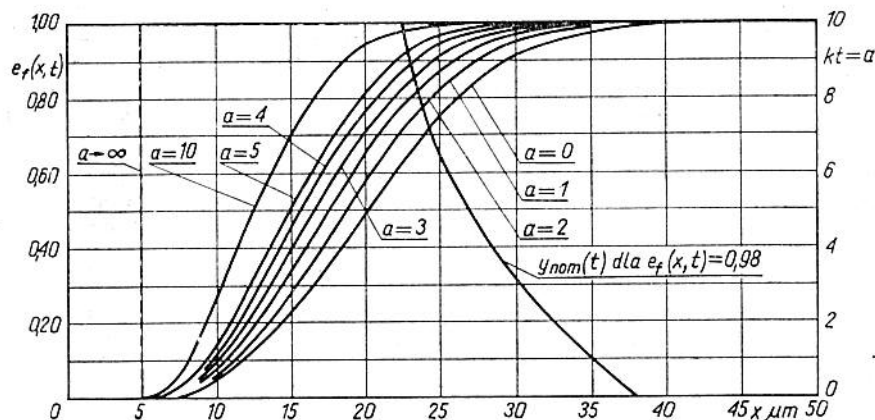
Tabl. 4.1. (c.d.)

x μm	$e_f(x, t)$		
	$a = 0,80000$	$a = 0,90000$	$a = 1,00000$
5,000	0,000000	0,000000	0,000000
10,000	0,058646	0,060148	0,061663
15,000	0,262707	0,268214	0,273727
20,000	0,554273	0,562583	0,570817
25,000	0,803464	0,909805	0,815991
30,000	0,933234	0,936290	0,939227
35,000	0,977893	0,979106	0,980261
40,000	0,993464	0,993851	0,994217
45,000	0,998960	0,999026	0,999082
50,000	1,000000	1,000000	1,000000
	$a = 2,00000$	$a = 3,00000$	$a = 4,00000$
5,000	0,000000	0,000000	0,000000
10,000	0,077433	0,094018	0,111033
15,000	0,328702	0,382042	0,432339
20,000	0,648382	0,716064	0,773291
25,000	0,869610	0,909568	0,938329
30,000	0,962758	0,977805	0,987063
35,000	0,989045	0,994114	0,996920
40,000	0,996935	0,998429	0,000217
45,000	0,999519	0,999757	0,999880
50,000	1,000000	1,000000	1,000000
	$a = 5,000$	$a = 6,000$	$a = 7,000$
μm			
5,00	0,000	0,000	0,000
10,00	0,135	0,154	0,173
15,00	0,504	0,552	0,596
20,00	0,829	0,866	0,895
25,00	0,956	0,971	0,981
30,00	0,992	0,996	0,998
35,00	0,998	0,999	1,000
40,00	1,000	1,000	1,000
45,00	1,000	1,000	1,000
50,00	1,000	1,000	1,000
	$a = 8,000$	$a = 9,000$	$a = 10,000$
5,00	0,000	0,000	0,000
10,00	0,192	0,211	0,229
15,00	0,636	0,672	0,706
20,00	0,918	0,936	0,950
25,00	0,987	0,992	0,994
30,00	0,999	0,999	1,000
35,00	1,000	1,000	1,000
40,00	1,000	1,000	1,000
45,00	1,000	1,000	1,000
50,00	1,000	1,000	1,000

stałe w czasie. Wykres przebiegu $\epsilon_0(y)$ jest wynikiem operacji matematycznej określonej wzorem (4.155) przy założeniu rozkładu cząstek w cieczy roboczej aproksymowanej wykładniczą funkcją gęstości. Charakterystyki odfiltrowania obliczono dla ciągu wartości a od 0 do 10. Zmienna a zawiera w sobie parametry procesu filtrowania określające przegrodę filtracyjną (liczbę porów n i stałą filtru $A_0 = \int_0^{50} \frac{k_0(y)}{y^4} dy = 2,23 \cdot 10^{-5}$), koncentrację cząstek za-

nieczyszczeń cieczy roboczej z_0 , natężenie przepływu cieczy roboczej Q_0 i czas filtrowania t . Znajomość tych parametrów w konkretnych warunkach eksploatacyjnych umożliwi obliczenie wartości a , a przez to określenie charakterystyk odfiltrowania przy wykorzystaniu katalogu charakterystyk odfiltrowania obliczonego przy użyciu maszyny cyfrowej. Katalog ten można przedstawić w postaci tablic lub wykresów.

W tabl. 4.1 przedstawiono wyciąg z obliczeń charakterystyki odfiltrowania na maszynie cyfrowej Odra dla a od 0 do 4 z dokładnością do 6 miejsc po przecinku oraz dla pozostałych wartości z dokładnością do 3 miejsc po przecinku.



Rys. 4.16. Wyniki obliczeń zmian charakterystyki odfiltrowania przy użyciu maszyny cyfrowej

Na rys. 4.16 przedstawiono wykresy charakterystyk odfiltrowania $e_f(x, t)$ sporządzone na podstawie danych z maszyny cyfrowej oraz wykres zmiany nominalnej dokładności filtrowania w czasie $y_{nom}(t)$ dla $e_f(x, t) = 0,98$.

4.3. Wyznaczanie czasu filtrowania

4.3.1. Wyznaczanie spadku ciśnienia na przegrodzie filtracyjnej

Określenie *czasu filtrowania*, rozumianego jako czas pracy przegrody filtracyjnej, po którym różnica ciśnień na przegrodzie względnie zmiana natężenia przepływu osiągną dopuszczalne, wynikające z zaleceń eksploatacyjnych wartości, jest ważnym warunkiem uzupełniającym własności filtracyjne filtrów płynów roboczych. Czas filtrowania jest związany z intensywnością dopływu cząstek zanieczyszczeń do przegrody filtracyjnej i zależy głównie od koncentracji zanieczyszczeń w płynie roboczym oraz od ich rozkładu wymiarowego, a więc parametrów na ogół zmiennych. Analityczne wyznaczenie czasu filtrowania jest więc utrudnione nie tylko na skutek zmienności tych parametrów w różnych układach płynowych spowodowanej zewnętrznymi oddziaływaniami, lecz także na skutek powstawania cząstek zanieczyszczeń wewnątrz układu, najczęściej jako produktów zużycia. W związku z tym w celu wyznaczenia czasu filtrowania płynów roboczych przez przegrodę filtracyjną, rozpatrzmy dwa przypadki: pierwszy, w którym ilość cząstek zanieczyszczeń w płynie roboczym jest stała i drugi, w którym ilość ta zmienia się liniowo w czasie pracy układu.

Problem teoretyczny można teraz sprowadzić do wyznaczenia powiązań między parametrami filtracyjnymi przegrody a parametrami cząstek zanieczyszczeń dla obu tych przypadków. Wykażemy, że przyjęcie określonych założeń związanych z cząstkami zanieczyszczeń w płynie roboczym umożliwia wyznaczenie, na podstawie krótkotrwałego badania, względnej różnicy ciśnień na przegrodzie filtracyjnej przy zachowaniu stałego natężenia przepływu. W ten sposób jest możliwe określenie czasu filtrowania jako ważnego parametru eksploatacyjnego filtru. Znajomość charakterystyki odfiltrowania jako podstawowego parametru oceny efektywności filtrowania łącznie z możliwością wyznaczenia czasu filtrowania w rzeczywistych warunkach pracy, umożliwia dokonanie wyboru filtru o odpowiedniej dla danych zastosowań efektywności i najdłuższym czasie pracy.

Spadek ciśnienia na przegrodzie filtracyjnej wyznaczmy opierając się na poprzednich założeniach dotyczących cząstek zanieczyszczeń i przegrody filtracyjnej.

Liczba porów $n(y, t)$ przegrody filtracyjnej o wymiarze y w czasie t filtrowania wynosi

$$n(y, t) = n f_A(y, t) \quad (4.156)$$

Na podstawie (4.98) i (4.156) natężenie przepływu płynu roboczego przez wszystkie pory o wymiarze y jest równe

$$q(y, t) n(y, t) = \frac{Q_0 \eta_0}{p_0 A_0} \frac{p(t)}{\eta(t)} y^4 f_A(y, t) \quad (4.157)$$

przy czym

$$A_0 = A(t) \Big|_{t=0} = \int_0^\infty y^4 f_0(y) dy \quad (4.158)$$

Całkowite natężenie przepływu $Q(y, t)$ przez wszystkie pory przegrody filtracyjnej po upływie czasu t wynosi

$$Q(y, t) = \int_0^\infty \frac{Q_0 \eta_0}{p_0 A_0} \frac{p(t)}{\eta(t)} y^4 f_A(y, t) dy \quad (4.159)$$

Załóżymy stałe natężenie przepływu przez przegrodę filtracyjną oraz $\eta(t) = \eta_0 = \text{const}$ i dla takich warunków wyznaczmy spadek ciśnienia $p(t)$.

Różniczkując względem czasu wyrażenie (4.159) otrzymamy

$$\int_0^\infty \frac{Q_0}{p_0 A_0} y^4 \left[p(t) \frac{df_A(y, t)}{dt} + f_A(y, t) \frac{dp(t)}{dt} \right] dy = 0 \quad (4.160)$$

Równanie (4.160) będzie spełnione, gdy

$$\frac{dp(t)}{dt} = - \frac{df_A(y, t)}{f_A(y, t)} \quad (4.161)$$

a po scałkowaniu otrzymamy

$$p(t) = \frac{C}{f_A(y, t)} \quad (4.162)$$

Jeżeli

$$f_A(y, t) \Big|_{t=0} = f_0(y) \quad \text{i} \quad p(t) \Big|_{t=0} = p_0 \quad (4.163)$$

to

$$C = p_0 f_0(y) \quad (4.164)$$

a więc

$$p(t) = p_0 \frac{f_0(y)}{f_A(y, t)} \quad (4.165)$$

lub

$$f_A(y, t) = f_0(y) \frac{p_0}{p(t)} \quad (4.166)$$

Podstawiając (4.165) do (4.78) oraz uwzględniając (4.109), mamy

$$p(t) = p_0 \exp [A(y, t)] \quad (4.167)$$

i korzystając z (4.108) przy poczynionym już założeniu $\eta(t) = \eta_0$, otrzymamy

$$p(t) = p_0 \exp \left\{ \frac{Q_0 y^4}{n p_0 A_0} \int_0^t p(\tau) z(\tau) [1 - G(y, \tau)] dt \right\} \quad (4.168)$$

4.3.2. Wyznaczanie spadku ciśnienia przy liniowo narastającej ilości zanieczyszczeń

W celu wyznaczenia zmian spadku ciśnienia $p(t)$ na przegrodzie filtracyjnej dokonamy następujących założeń:

1) ilość zanieczyszczeń w płynie roboczym w czasie pracy urządzenia przyjmujemy za liniową funkcję czasu

$$z(t) = z_0 + z_1 t \quad (4.169)$$

gdzie: z_0 — ilość cząstek zanieczyszczeń w płynie roboczym na początku rozpatrywania procesu filtrowania, z_1 — ilość cząstek zanieczyszczeń wprowadzania do płynu roboczego w jednostce czasu podczas pracy urządzenia;

2) zależność półempiryczna określająca zmiany spadku ciśnienia $p(t)$ w czasie, potwierdzona doświadczalnie, ma postać

$$p(t) = \frac{p_0}{1 + p_1 t + p_2 t^2 + p_3 t^3 + \dots} \quad (4.170)$$

3) ilość cząstek zanieczyszczeń $z(t) \gg z_0$, tak że przyjmujemy $z_0 = 0$ i na podstawie (4.169)

$$z(t) = z_1 t \quad (4.171)$$

4) w wzorze (4.170) wszystkie współczynniki oprócz p_2 są równe zero, a $p_2 \geq 0$

$$p(t) = \frac{p_0}{1 + p_2 t^2} \quad (4.172)$$

5) funkcja rozkładu zanieczyszczeń w czasie jest stała, czyli $g(x, t) = g_0(x)$.

Na podstawie powyższych założeń wyrażenie (4.168) przyjmie postać

$$p(t) = p_0 \exp \left[\beta_1 \int_0^t \frac{\tau}{1 + p_2 \tau^2} d\tau \right] \quad (4.173)$$

przy czym

$$\beta_1 = \frac{Q_0 y^4 [1 - G_0(y)] z_1}{n A_0} \quad (4.174)$$

P_0 scałkowaniu

$$p(t) = p_0 \exp \left[\frac{\beta_1}{2p_2} \ln(1 + p_2 t^2) \right] \quad (4.175)$$

a stąd po podstawieniu (4.175) do (4.172)

$$\frac{p_0}{1 + p_2 t^2} = p_0 (1 + p_2 t^2)^{\beta_2} \quad (4.176)$$

zatem

$$(1 + p_2 t^2)^{\beta_2 + 1} = 1 \quad (4.177)$$

przy czym

$$\beta_2 = \frac{\beta_1}{2p_2} = \frac{Q_0 y^4 [1 - G_0(y)] z_1}{2n A_0 p_2} \quad (4.178)$$

Równanie (4.177) jest spełnione dla każdego $\beta_2 = -1$.

Zastępując we wzorze (4.172) p_2 otrzymanym wyrażeniem (4.178) będziemy mieli

$$p(t) = p_0 \frac{1}{1 - \frac{Q_0 y^4 [1 - G_0(y)] z_1}{2n A_0} t^2} \quad (4.179)$$

4.3.3. Wyznaczanie spadku ciśnienia dla stałej w czasie ilości zanieczyszczeń

Jeżeli założymy przypadek, w którym ilość zanieczyszczeń w układzie jest w przybliżeniu stała w czasie, to słuszne będzie przyjęcie $z_1 = 0$ i na podstawie (4.169) otrzymamy

$$z(t) = z_0 \quad (4.180)$$

Jeżeli przyjmiemy ponadto, że wszystkie współczynniki oprócz p_1 w wyrażeniu (4.169) są równe zeru, a $p_1 \geq 0$, to

$$p(t) = p_0 \frac{1}{1 - p_1 t} \quad (4.181)$$

a zależność (4.168) przyjmie postać

$$p(t) = p_0 \exp \left[\beta_3 \int_0^t \frac{1}{1 + p_1 \tau} d\tau \right] \quad (4.182)$$

przy czym

$$\beta_3 = \frac{Q_0 y^4 z_0}{n A_0} [1 - G_0(y)] \quad (4.183)$$

Po obliczeniu całki w wyrażeniu (4.182) otrzymamy

$$p(t) = p_0 \exp \left[\frac{\beta_3}{p_1} \ln(1 + p_1 t) \right] \quad (4.184)$$

i stąd po podstawieniu (4.184) do (4.181)

$$\frac{p_0}{1 + p_1 t} = p_0 (1 + p_1 t)^{\beta_4} \quad (4.185)$$

zatem

$$(1 + p_1 t)^{\beta_4 + 1} = 1 \quad (4.186)$$

przy czym

$$\beta_4 = \frac{\beta_3}{p_1} = \frac{Q_0 y^4 z_0 [1 - G_0(y)]}{n A_0 p_1} \quad (4.187)$$

Równanie (4.186) jest spełnione dla każdego $\beta_4 = -1$ czyli dla

$$p_1 = - \frac{Q_0 y^4 z_0 [1 - G_0(y)]}{n A_0} \quad (4.188)$$

Zastępując we wzorze (4.181) p_1 otrzymanym wyrażeniem (4.188), będziemy mieli

$$p(t) = p_0 \frac{1}{1 - \frac{Q_0 y^4 z_0 [1 - G_0(y)]}{n A_0} t} \quad (4.189)$$

Otrzymane zależności (4.179) i (4.188) na zmianę spadku ciśnienia na przegrodzie filtracyjnej $p(t)$ mogą być stosowane w zależności od warunków eksploatacyjnych pracy filtru. W wielu przypadkach zaleca się posługiwać wyrażeniem (4.179) jako najlepszym przybliżeniem stanu rzeczywistego.

4.3.4. Obliczanie czasu filtrowania

W celu obliczenia wyrażeń określających czas filtrowania przegrody filtracyjnej rozważymy wyrażenie (4.179) korzystając z zależności (4.159). Zakładając, że spadek ciśnienia $p(t)$ jest jednako-

wy na całej przegrodzie filtracyjnej oraz $\eta(t) = \eta_0$ przekształcimy (4.159) do postaci

$$p(t) = \frac{Q(y, t)}{\int_0^{\infty} \frac{Q_0}{p_0 A_0} y^4 f_A(y, t) dy} \quad (4.190)$$

oraz podstawiając wyrażenie $f_A(y, t)$ z (4.78) przy uwzględnieniu (4.109)

$$p(t) = \frac{Q(y, t)}{\int_0^{\infty} \frac{Q_0}{p_0 A_0} y^4 f_0(y) \exp[-A(y, t)] dy} \quad (4.191)$$

przy czym

$$A(y, t) = \frac{Q_0 y^4 z_1}{n A_0} [1 - G(y)] \int_0^t \frac{\tau}{1 + p_2 \tau^2} dt \quad (4.192)$$

natomiast p_2 jest określone za pomocą (4.178).

Wykonując całkowanie względem czasu otrzymamy

$$A(y, t) = \frac{Q_0 y^4 z_1}{n A_0} [1 - G(y)] \frac{1}{2 p_2} \ln(1 + p_2 t^2) \quad (4.193)$$

lub

$$A(y, t) = -\ln \left\{ 1 - \frac{Q_0 y^4 [1 - G(y)] z_1}{2 n A_0} t^2 \right\} \quad (4.194)$$

Obecnie zależność (4.191) przyjmie postać

$$p(t) = \frac{Q(y, t)}{\int_0^{\infty} \frac{Q_0 y^4}{p_0 A_0} f_0(y) \left\{ 1 - \frac{Q_0 y^4 [1 - G_0(y)] z_1}{2 n A_0} t^2 \right\} dy} \quad (4.195)$$

Na podstawie (4.195) rozpatrzmy wyrażenie

$$p(t) = \frac{Q(y, t)}{p_0 \int_0^{\infty} \frac{Q_0 y^4}{A_0} f_0(y) dy - \left\{ \int_0^{\infty} \frac{Q_0^2 y^8 z_1 [1 - G_0(y)]}{2 n A_0^2} f_0(y) dy \right\} t^2} \quad (4.196)$$

w którym pierwszy człon mianownika prawej strony określa natężenie przepływu. Zakładając, że natężenie przepływu jest stałe,

spadek ciśnienia na przegrodzie filtracyjnej będzie wzrastać i przy $p(t) \rightarrow \infty$, $t \rightarrow t_{max}$. Przegroda zostanie więc całkowicie zatkana po czasie $t = t_{max}$, wynoszącym

$$t_{max} = \sqrt{\frac{Q(y, t)}{\frac{Q_0^2 z_1}{2nA_0^2} \int_0^\infty f_0(y) [1 - G_0(y)] y^8 dy}} \quad (4.197)$$

Jeżeli w powyższych rozważaniach przyjmiemy, że $Q(y, t) = Q_0$, to

$$t_{max} = \frac{1}{\beta_3 \sqrt{\int_0^\infty f_0(y) [1 - G_0(y)] y^8 dy}} \quad (4.198)$$

przy czym
$$\beta_3 = A_0 \sqrt{\frac{2n_0}{Q_0 z_1}} \quad (4.199)$$

Można więc zapisać

$$\frac{p(t)}{p_0} = \frac{1}{1 - \frac{t^2}{t_{max}^2}} \quad (4.200)$$

lub

$$t_{max} = \frac{t}{\sqrt{1 - \frac{p_0}{p(t)}}} \quad (4.201)$$

Postępując analogicznie jak powyżej obliczymy t_{max} dla wyrażenia (4.189) z zależności

$$t_{max} = \frac{t}{1 - \frac{p_0}{p(t)}} \quad (4.202)$$

Z powyższych rozważań teoretycznych wynika, że jest możliwe wyznaczenie zmian w czasie spadku ciśnienia na przegrodzie filtracyjnej przy stałym natężeniu przepływu w dwóch przypadkach: przy stałym i zmieniającym się liniowo poziomie koncentracji zanieczyszczeń w płynie roboczym. Ponadto wyznaczone zależności teoretyczne, określające względną zmianę spadku ciśnienia na przegrodzie filtracyjnej przy stałym natężeniu przepływu, umożliwiają określenie czasu filtrowania tej przegrody. Wzory (4.201) i (4.202) wiążące względny spadek ciśnienia na przegrodzie filtra-

cyjnej i czas filtrowania („bieżący i najdłuższy”) umożliwiają poprzez krótkotrwałe badania zmian w czasie spadku ciśnienia, obliczenie dopuszczalnego lub dowolnego czasu pracy filtru w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych.

4.4. Filtrowanie magnetyczne

4.4.1. Zasada działania filtrów magnetycznych

Filtrowanie magnetyczne stanowi odmianę filtrowania energetycznego polegającego na odmienności oddziaływania pola sił na płyn (ciecz i gaz) i zawarte w nim ciała stałe (zanieczyszczenia). Rozróżnia się wiele sposobów oddziaływania energetycznego na płyn roboczy, umożliwiających filtrowanie. W filtrach energetycznych urządzeń pneumatycznych najczęściej są wykorzystywane *siły ciężkości (filtry grawitacyjne)*, *siły płynodynamiczne* i rzadziej inne rodzaje sił.

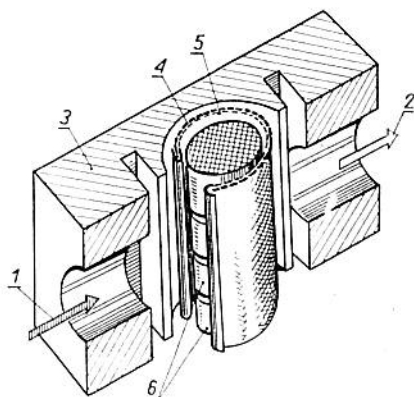
W technice odpylania powietrza i gazów technologicznych coraz częściej są stosowane *filtry elektryczne*. W technice filtrowania cieczy roboczych rozpowszechniają się dość szybko *filtry magnetyczne*, *elektryczne* oraz *hydrodynamiczne*. Ustalona jest oprócz tego rola filtrowania grawitacyjnego w urządzeniach hydraulicznych. Zastosowanie filtrów grawitacyjnych jest ograniczone do urządzeń stacjonarnych, wykorzystujących duże ilości cieczy (odstożniki, komory odsadze).

Zajmiemy się tutaj rozważaniem przede wszystkim *filtrów magnetycznych*. Budowę takich filtrów zawsze cechuje zastosowanie magnesów stałych lub elektromagnesów. Należy przy tym podkreślić, że filtry magnetyczne w większości przypadków są *filtrami kombinowanymi (złożonymi)*, w których wykorzystuje się różne sposoby filtrowania.

I tak, w zbiornikach są stosowane *wkłady magnetyczne* lub *kosze magnetyczne*. Ich skuteczność działania wynika z wolnego przepływu cieczy i sedymentacji cząstek w objętości komory zbiornikowej, bowiem zakres oddziaływania energetycznego pola sił takich filtrów jest niewielki. Omówimy zasadę filtrowania magnetycznego na przykładzie budowy filtrów magnetyczno-mechanicznych niepełnoprzepływowych, bowiem większość filtrów energetycznych ma taką cechę charakterystyczną.

Działanie takich filtrów, prowadzące do oczyszczania płynów z zanieczyszczeń o różnym składzie chemicznym i różnych wymiarach, nie jest dostatecznie wyjaśnione. Analizując schemat budowy

filtru, przedstawiony na rys. 4.17, można stwierdzić, że wpływ cieczy wlotem 1 jest kształtowany odpowiednią budową kadłuba 3 filtru, taki że strumień „nożowy” działa bezpośrednio na zespół magnesów walcowych 6 przez wycięcie w obójmie siatkowej, utworzonej z siatki wewnętrznej 5 i wzmocnionej siatką zewnętrzną (ferromagnetyczną) 4. Główna część strumienia mająca energię kinetyczną prędkości ulega wyhamowaniu w przestrzeni między obejmą siatkową a zespołem magnesów tak, że „quasi-potencjalna” energia nadciśnienia w tej przestrzeni powoduje filtrowanie me-



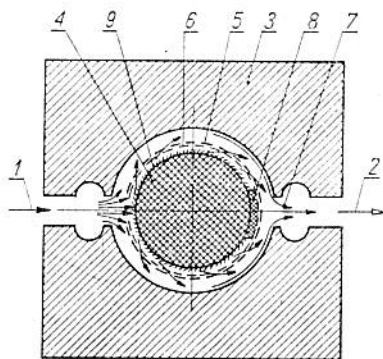
Rys. 4.17. Schemat budowy filtru mikronowego magnetyczno-mechanicznego

chaniczne przez siatkę 5 i dalszy wypływ, łącznie z pozostałą częścią przepływającej cieczy, wylotem 2.

Na rys. 4.18 przedstawiono schemat filtrowania oraz tory przepływającej cieczy. Osad zanieczyszczeń gromadzi się w ten sposób, że część cząstek ulega zatrzymaniu na powierzchni czoła uderzenia strumienia w magnes. Są to przeważnie zanieczyszczenia ferromagnetyczne. Podobnie gromadzą się cząstki na całym obwodzie powierzchni filtrów w postaci osadu „strzępowego”. Największa część zatrzymanych cząstek jest gromadzona w przeciwnym do wlotu obszarze przestrzeni, najpierw w postaci bardzo luźnej masy porowatej, ulegającej ciągłemu „zbiłaniu się” i powiększaniu w procesie filtrowania.

Cząstki o większych wymiarach oraz prawdopodobnie ich całe grupy osadzają się na powierzchni siatki „dokładnego” oczyszczania. W ten sposób w czasie filtrowania ulega zmniejszeniu obszar silnego oddziaływania pola magnetycznego i równocześnie jest utrudnione filtrowanie mechaniczne ze względu na powiększanie się warstwy osadu. Chociaż ten ostatni efekt umożliwia zatrzymywanie coraz mniejszych cząstek, praktycznie jednak zatykanie po-

rów powoduje powiększenie spadku ciśnienia na siatce filtracyjnej. Jednak całkowity spadek ciśnienia na filtrze pozostaje prawie niezmienny, ze względu na możliwość swobodnego opływu na zewnątrz siatki, a zatem coraz większa część cieczy płynie poza stre-



Rys. 4.18. Schemat filtrowania cieczy filtrem magnetycznym; 1 — wlot cieczy zanieczyszczonej, 2 — wypływ cieczy częściowo zanieczyszczonej, 3 — kadłub filtru, 4 — blok magnesów, 5 — siatka podporowa, 6 — siatka dokładnego oczyszczania, 7 — torzy przepływającej cieczy, 8 — osad zanieczyszczeń zatrzymanych przez filtr, 9 — osad strzępowy

fę efektywnego zatrzymywania zanieczyszczeń. Tak więc, chociaż efektywność filtrowania mechanicznego „obejmy siatkowej” wzrasta, skutek ilościowy jednak zmniejsza się tak samo, jak i filtrowania magnetycznego.

4.4.2. Wyjaśnienie zjawisk fizycznych

Rozpatrzmy jakościowo zjawiska fizyczne zachodzące w filtrze magnetycznym do oczyszczania olejów i wyjaśnimy efekty powodujące oddzielenie zanieczyszczeń od oleju oraz rolę rdzenia magnetycznego i siatki w procesie filtrowania.

Dokonyamy następujących założeń upraszczających. Po pierwsze, pomija się wpływ pola magnetycznego na ciecz (olej), jako mało istotny dla efektu filtrowania. Pole magnetyczne może jedynie zmienić rozkład prędkości oleju. Po drugie, nie rozważa się fizyko-chemicznego oddziaływania oleju z zawiesiną. Przyjmuje się tylko, że oddziaływanie to powoduje unoszenie zawiesiny do obszaru wypełnionego polem magnetycznym. Po trzecie, zakłada się że zanieczyszczenia są elektrycznie obojętne. Uproszczenia te wprowadzono, aby uzyskać wstępną koncepcję możliwie najprostszą i łatwo sprawdzalną.

Punktem wyjścia do dalszych rozważań jest następujący model. Zanieczyszczenia przepływają przez obszar oddziaływania pola magnetycznego. Nie interesują nas przy tym siły, które powodują przepływ tych cząstek (siły lepkości). Zajmiemy się wyłącznie wpływem pola magnetycznego na cząstki. Jak się przekonamy, wpływ ten będzie w dużym stopniu zależeć od własności magnetycznych tych cząstek. Określimy siły wywierane przez pole magnetyczne na cząstki ośrodka stałego.

Stałe pole magnetyczne w ośrodkach materialnych opisują dwa wektory \vec{B} i \vec{H} . Wektor \vec{B} nazywa się indukcją magnetyczną, natomiast \vec{H} — natężeniem pola magnetycznego. Oba wektory są związane z sobą następującą zależnością

$$\vec{B} = \vec{H} + 4\pi\vec{M} \quad (4.203)$$

Wektor \vec{M} jest nazywany *namagnesowaniem* (*magnetyzacją*). Jest to moment magnetyczny indukowany w jednostce objętości danego ciała. W próżni $\vec{M} = 0$ i $\vec{B} = \vec{H}$. W ciałach izotropowych i nieferromagnetycznych namagnesowanie w niezbyt silnych polach jest liniową funkcją natężenia pola magnetycznego

$$\vec{M} = \kappa\vec{H} \quad (4.204)$$

Stały współczynnik κ nazywa się *podatnością magnetyczną*. Jest to wielkość bezwymiarowa, ujemna dla ciał diamagnetycznych, dodatnia dla paramagnetycznych.

Stosunek momentu magnetycznego indukowanego w jednostce masy do natężenia przyłożonego pola magnetycznego nazywamy *podatnością magnetyczną właściwą*

$$\kappa = \frac{\kappa}{\rho} \quad (4.205)$$

Wszystkie wielkości w tych wzorach są wyrażone w jednostkach układu elektromagnetycznego CGS, czyli

$$\begin{aligned} \vec{B} &= 1 \text{ Gs} & \rho &= 1 \text{ g/cm}^3 \\ \vec{H} &= 1 \text{ Oe} & \vec{M} &= 1 \text{ erg}/(\text{Gs} \cdot \text{cm}^3) \\ \kappa &= 1 & \kappa &= 1 \text{ cm}^3/\text{g} \end{aligned}$$

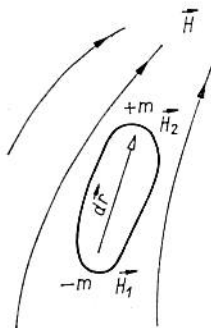
Oczywiście, gaus = ersted, a wymiary \vec{M} i \vec{B} są identyczne. Jednakże ze względu na czynnik 4π we wzorze (4.203) jednostka \vec{M} nie jest równa jednostce B .

Na ciało stałe o momencie magnetycznym \vec{M} umieszczone w jednorodnym polu \vec{H} będzie działała siła skręcająca oraz; jeśli pole nie jest jednorodne ($\vec{H} \neq \text{const}$) będzie również działała siła

translacji. Zajmiemy się tylko tą ostatnią siłą, gdyż może ona prowadzić do efektu filtrowania. Jej wielkość oblicza się w następujący sposób. Dipol magnetyczny o natężeniu biegunów m odległych o $d\vec{r}$ ma moment magnetyczny

$$\vec{\mathcal{M}} = m d\vec{r} \quad (4.206)$$

Jeśli natężenie pola w punkcie, gdzie znajduje się biegun $-m$ wynosi \vec{H}_1 , to siła wywierana przez pole na tę część ciała jest równa $-m\vec{H}_1$. Podobnie siła działająca na biegun $+m$ wyniesie $m\vec{H}_2$ (rys. 4.19).



Rys. 4.19. Siła magnetyczna działająca na dipol

Siła wypadkowa działająca na ciało umieszczone w polu H

$$\vec{F} = m d\vec{H} \quad (4.207)$$

przy czym

$$d\vec{H} = \vec{H}_2 - \vec{H}_1 \quad (4.208)$$

Oczywiście w polu jednorodnym $\vec{H}_1 = \vec{H}_2 = \text{const}$ i $\vec{F} = 0$. Wektor $d\vec{H} = (dH_x, dH_y, dH_z)$ dla ciał o małych rozmiarach można przedstawić następująco

$$dH_\alpha = dx \frac{\partial H_\alpha}{\partial x} + dy \frac{\partial H_\alpha}{\partial y} + dz \frac{\partial H_\alpha}{\partial z}, \quad \alpha = x, y, z \quad (4.209)$$

Wprowadzając wektory $d\vec{r} = (dx, dy, dz)$ i $\text{grad} = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$ otrzymamy

$$dH_\alpha = (d\vec{r} \text{ grad}) H_\alpha \quad (4.210)$$

skąd

$$d\vec{H} = (d\vec{r} \text{ grad}) \vec{H} \quad (4.211)$$

Podstawiając to wyrażenie do wzoru (4.207) uzyskuje się

$$\vec{F} = (m d\vec{r} \text{ grad}) \vec{H} \quad (4.212)$$

albo zgodnie z definicją (4.206)

$$\vec{F} = (\vec{\mathcal{M}} \text{ grad}) \vec{H} \quad (4.213)$$

Dzieląc wzór (4.213) przez objętość próbki V otrzymamy gęstość siły

$$\vec{f} = \left(\frac{\vec{\mathcal{M}}}{V} \text{ grad} \right) \vec{H} \quad (4.214)$$

lub

$$\vec{f} = \frac{\vec{F}}{V} \quad (4.215)$$

Ponieważ wielkość $\vec{\mathcal{M}}/V$ jest wprowadzonym wcześniej namagnesowaniem \vec{M} , przeto

$$\vec{f} = (\vec{M} \text{ grad}) \vec{H} \quad (4.216)$$

Korzystając z zależności (4.204) można wyrazić \vec{f} jako funkcję pola i stałej materiałowej \varkappa

$$\vec{f} = \varkappa (\vec{H} \text{ grad}) \vec{H} \quad (4.217)$$

Uzyskane wyrażenie można przekształcić wykorzystując znany wzór z analizy wektorowej

$$\vec{H} \times \text{rot } \vec{H} = \frac{1}{2} \text{ grad } H^2 - (\vec{H} \text{ grad}) \vec{H} \quad (4.218)$$

Jeśli mamy do czynienia z polem magnetycznym wytworzonym przez magnes, to $\text{rot } \vec{H} = 0$ i

$$(\vec{H} \text{ grad}) \vec{H} = \frac{1}{2} \text{ grad } H^2 \quad (4.219)$$

Wzór na gęstość siły przyjmie wtedy postać

$$\vec{f} = \frac{1}{2} \varkappa \text{ grad } H^2 \quad (4.220)$$

W tablicach wielkości fizycznych podaje się zwykle podatność magnetyczną χ . Wygodniej więc będzie zapisać wzór (4.220) w takiej postaci, aby zamiast \varkappa występowało χ . Po podzieleniu obu stron równości (4.22) przez gęstość ciała uzyskamy

$$\vec{f}_m = \frac{1}{2} \chi \text{ grad } H^2 \quad (4.221)$$

Tablica 4.2. Podatność magnetyczna właściwa pierwiastków, związków oraz różnych ciał stałych w temperaturze 15 do 22°C (znak minus oznacza ciała diamagnetyczne, znak plus — ciała paramagnetyczne)

Rodzaj ciała	$\chi \cdot 10^6$	Rodzaj ciała	$\chi \cdot 10^6$
Antymon	-0,87	Cu ₂ O	+1,2
Chrom	+3,6	FeCl ₂	+101,2
Cyna	+0,025	Fe ₂ O ₃	+20,6
Cynk	-0,157	MgO	-0,25
Drewno	-0,3 do +0,7	MnO ₂	+38,4
Ebonit	+0,6	MnO	+75,9
Glin	+0,65	Mn ₂ O ₃	+69,0
Krzem	+0,13	Mn ₃ O ₄	+55,8
Magnez	+0,55	Mo ₂ O ₃	-0,35
Mangan	+9,9	NiO	+53,7
Marmur	-0,8	P ₂ O ₅	-0,46
Miedź	-0,070	PbO	-0,13
Molibden	+0,04	Pb ₃ O ₄	-0,24
Olów	-0,12	Sb ₂ O ₃	-0,19
Siarka	-0,49	SiO ₂	-0,493
Szkło	-0,90 do -0,30	SnO	-0,11
Tytan	+1,25	SnO ₂	-0,050
Wapń	+1,1	TiO ₂	+0,066
Węgiel	-3,5 do -0,45	WO ₃	+0,81
Wolfram	+0,28	VO ₂	+3,73
Al ₂ O ₃	-0,098	V ₂ O ₃	+13,9
CaCl ₂	-0,49	V ₂ O ₅	+0,85
Cr ₂ O ₃	+25,5	ZnO	-0,362
CuO	+3,8	ZrO ₂	-0,112

a więc

$$\vec{f}_m = \frac{\vec{F}}{\rho V} \quad (4.222)$$

jest siłą wywieraną przez pole \vec{H} na jednostkę masy ciała (1 g).

Ciała paramagnetyczne charakteryzują się podatnością właściwą χ zawartą w granicach od $0,1 \cdot 10^{-6}$ do $40 \cdot 10^{-6}$ cm³/g. Ciała magnetyczne mają ujemną podatność właściwą zawartą w granicach od $-1,6 \cdot 10^{-6}$ do $-0,1 \cdot 10^{-6}$ cm³/g. Wartości χ dla niektórych ciał stałych podano w tablicy 4.2.

Dla ciał ferromagnetycznych można również formalnie stosować związek (4.203), który po uwzględnieniu (4.205) można napisać w postaci

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (4.223)$$

Współczynnik

$$\mu = 1 + 4\pi\chi \quad (4.224)$$

nazywamy *przenikalnością magnetyczną*, zależy nie tylko od pola \vec{H} , ale i od wcześniejszych stanów próbki. Przenikalność magnetyczna ciał ferromagnetycznych jest wielkością dodatnią, bezwymiarową i zawiera się w granicach od 9 do 10^6 .

Podatność magnetyczna

$$\chi = \frac{\mu - 1}{4\pi} \quad (4.225)$$

jak również *podatność magnetyczna właściwa*

$$\chi = \frac{\mu - 1}{4\pi\rho} \quad (4.226)$$

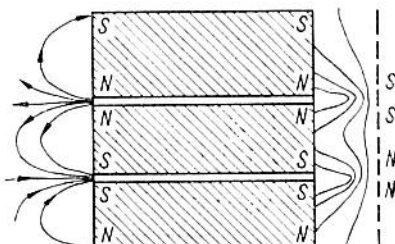
będą dla tych ciał 10^6 do 10^{12} razy większe niż dla cieczy paramagnetyków. Zatem siła określona wzorem (4.221) będzie o tyle razy większa dla tej ostatniej grupy ciał.

Przeprowadzimy teraz próbę wyjaśnienia efektu filtrowania. Magnes przedstawiony na rys. 4.20 wytwarza pole magnetyczne silnie niejednorodne. Po prawej stronie zaznaczono linie sił, po lewej — powierzchnie ekwipotencjalne. Wektor grad H^2 jest do nich prostopadły i skierowany do magnesu. Siatka zaznaczona linią przerywaną, jeśli jest wykonana z materiału ferromagnetycznego, zamyka większość linii sił pola \vec{H} .

W ten sposób w obszarze między siatką a magnesem występuje znacznie silniejszy gradient pola, niż w obszarze poza siatką. Warunki te sprawiają, że cząstki para- i ferromagnetyczne na zewnętrznej stronie siatki doświadczają słabej siły przyciągającej i uniemożliwiają

praktycznie wciągnięcie części cząstek do wnętrza obszaru między magne-
sem a siatką.

Większość cząstek jednakże trafia tam wraz z przepływającą
przez filtr cieczą. Jeżeli siła \vec{f}_m w obszarze między siatką a mag-
nesem przewyższa siłę lepkości, cząstki które dostaną się tam nie



Rys. 4.20. Niejednorodność pola magnetycznego wytwarzanego przez magne-
sy stałe

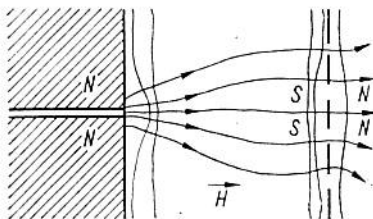
będą mogły wydostać się na zewnątrz. Przy przepływie cieczy
cząstki powinny odkładać się na powierzchni magnesu, tworząc
warstwę w kształcie powierzchni ekwipotencjalnej, zniekształconej
nieznacznie siłą ciężenia. Część cząstek w obszarze między magne-
sem a siatką, wskutek dynamicznego oddziaływania cieczy ulegnie
osadzeniu na powierzchni wewnętrznej siatki. Najczęściej we-
wnętrzna powierzchnia siatki ferromagnetycznej jest dodatkowo
pokryta materiałem porowatym o małych wymiarach porów. Cząst-
ki zanieczyszczeń o wymiarach większych od wymiarów porów tego
materiału oraz grupy cząstek trwale osadzają się, co stanowi do-
datkowy czynnik zwiększający efektywność filtrowania.

W powyższy sposób można wytłumaczyć gromadzenie się czą-
stek para- i ferromagnetycznych ($\chi > 0$). W przypadku cząstek
diamagnetycznych siła \vec{f}_m ma przeciwny kierunek i powoduje ruch
w kierunku malejącego pola ($\chi < 0$). W związku z tym cząstki dia-
magnetyczne (np. Si) znajdujące się wewnątrz obszaru siatki są od
niej odpychane. Hydrodynamiczne oddziaływanie cieczy umożli-
wia jednak osadzenie się tych cząstek na siatce, ponieważ siła od-
pychająca jest co najmniej kilkakrotnie słabsza od sił przyciąga-
jących cząstki para- i ferromagnetyczne i może co najwyżej utrud-
nić ruch cząstek diamagnetycznych, wpływających wraz z cieczą
do wewnątrz siatki.

Na cząstki diamagnetyczne, które znajdują się w obszarze
między magne-
sem a siatką będzie oddziaływać siła wypychająca
na zewnątrz. Można jednakże wyobrazić sobie niezależne warunki,
w których cząstki te nie opuszczą wnętrza siatki. Na rys. 4.21 siat-
ka znajduje się w takiej odległości, że pole przy jej powierzchni

wzrasta. Pojawi się wtedy minimum natężenia pola \vec{H} tuż przed siatką od strony wewnętrznej.

Na rys. 4.21 zaznaczono linie sił i powierzchnie stałego potencjału. Przy siatce po wewnętrznej stronie grad H^2 jest wtedy skierowany w stronę siatki. Na cząstki o ujemnej podatności χ działać będzie siła \vec{f}_m skierowana do wewnątrz. W przypadku istnienia takiego mechanizmu nastąpi gromadzenie się cząstek diamagnetycznych na siatce, a także powinny osiadać na niej w niewielkiej ilości cząstki para- i ferromagnetyczne. W przypadku siatki



Rys. 4.21. Korzystne usytuowanie siatki filtracyjnej w stosunku do magnesów

z materiału diamagnetycznego, czy paramagnetycznego efekt taki nie wystąpi. Walcowy kształt magnesu i siatki utrudniają praktycznie wytworzenie się warunków sprzyjających gromadzeniu się cząstek. Mechanizm oczyszczania cząstek diamagnetycznych wymaga odpowiedniego ukształtowania siatki z materiału ferromagnetycznego oraz doboru prędkości przepływu.

W rzeczywistości inne zjawiska decydują o oczyszczaniu z cząstek o ujemnej podatności χ . Jeśli występuje koagulacja, w wyniku której powstają grupy cząstek złożone np. z 10 cząstek, to przy 10⁰/₀ zawartości cząstek ferromagnetycznych w każdym zespoleniu znajdzie się przeciętnie jedna cząstka ferromagnetyczna. Siła \vec{f}_m działająca na tę jedną cząstkę może spowodować odpowiedni ruch i osadzanie się całych grup cząstek.

4.4.3. Wpływ pola magnetycznego na ośrodek ciekły

W ośrodku ciekłym, gdy \vec{B} zależy liniowo od \vec{H} , tzn. $\vec{B} = \mu \vec{H}$ współrzędne tensora napięć mają następującą postać

$$\sigma_{ik} = -p_0(\varrho, T) \delta_{ik} - \frac{H^2}{8\pi} \left[\mu - \varrho \left(\frac{\partial \eta}{\partial \varrho} \right)_T \right] \delta_{ik} + \frac{\mu H_i H_k}{4\pi} \quad (4.227)$$

gdzie $p_0(\varrho, T)$ jest rozkładem ciśnienia w cieczy o gęstości ϱ i temperaturze T bez pola magnetycznego \vec{H} , a μ — przenikalnością magnetyczną cieczy.

Współrzędne f_i siły objętościowej \vec{f} obliczamy ze wzoru

$$f_i = \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} \quad (4.228)$$

Różniczkując (4.227) oraz pamiętając, że $\text{div } \vec{B} = \text{div } \mu \vec{H} = 0$, znajdujemy

$$\vec{f} = -\nabla p_0 + \frac{1}{8\pi} \nabla \left[H^2 \varrho \left(\frac{\partial \mu}{\partial \varrho} \right)_T \right] - \frac{H^2}{8\pi} \nabla \mu - \frac{\mu}{8\pi} \nabla H^2 + \frac{\mu}{4\pi} (\vec{H} \nabla) \vec{H} \quad (4.229)$$

Ponieważ

$$(\vec{H} \nabla) \vec{H} = \frac{1}{2} \nabla H^2 - \vec{H} \times \text{rot } \vec{H} \quad (4.230)$$

a

$$\text{rot } \vec{H} = \frac{4\pi}{c} \vec{j} \quad (4.231)$$

więc

$$(\vec{H} \nabla) \vec{H} = \frac{1}{2} \nabla H^2 + \frac{4\pi}{c} (\vec{j} \times \vec{H}) \quad (4.232)$$

i ostatecznie

$$\vec{f} = -\nabla p_0 + \frac{1}{8\pi} \nabla \left[H^2 \varrho \left(\frac{\partial \mu}{\partial \varrho} \right)_T \right] - \frac{H^2}{8\pi} \nabla \mu + \frac{\mu}{c} (\vec{j} \times \vec{H}) \quad (4.233)$$

Jeżeli ośrodek jest jednorodny ($\nabla \mu = 0$) i nie przewodzi prądu elektrycznego, to

$$\vec{f} = -\nabla p_0 + \frac{1}{8\pi} \nabla \left[H^2 \varrho \left(\frac{\partial \mu}{\partial \varrho} \right)_T \right] \quad (4.234)$$

Dla cieczy znajdującej się w równowadze z polem magnetycznym $\vec{f} = 0$ i

$$\nabla p_0 = \frac{1}{8\pi} \nabla \left[H^2 \varrho \left(\frac{\partial \mu}{\partial \varrho} \right)_T \right] \quad (4.235)$$

skąd

$$p_0 = \varrho \left(\frac{\partial \mu}{\partial \delta} \right)_T \frac{H^2}{8\pi} + \text{const} \quad (4.236)$$

Wielkość $\varrho(\partial \mu / \partial \varrho)_T$ jest zwykle rzędu podatności κ .

4.4.4. Trwałość i charakterystyka odfiltrowania

Charakterystyka odfiltrowania jest znormalizowaną miarą zmniejszenia koncentracji zanieczyszczeń określonych rozmiarów za filtrem w stosunku do koncentracji zanieczyszczeń w płynie przed przejściem przez filtr. Najczęściej korzysta się z następującej jej postaci

$$e_f(x) = \frac{g(x) - r(x)}{g(x)} \quad (4.237)$$

gdzie: x — wymiar zanieczyszczeń, $g(x)$, $r(x)$ — rozkład wymiarów zanieczyszczeń odpowiednio przed i za filtrem.

Zmianę charakterystyki odfiltrowania w czasie $e_f(x, t)$ określa się również z powyższego wzoru dla $g(x, t)$ i $r(x, t)$. *Rozkłady wymiarów zanieczyszczeń* rozumie się praktycznie jako koncentracje cząstek o określonych zakresach wymiarowych x , chociaż teoretycznie nie istnieją cząstki o jednakowej wielkości.

Wychodząc z pojęcia charakterystyki odfiltrowania możemy określić pojęcie *trwałości filtrowania elementu filtracyjnego* (zakładamy, że to pojęcie trwałości nie ma nic wspólnego ze zużyciem fizycznym, starzeniem się elementu).

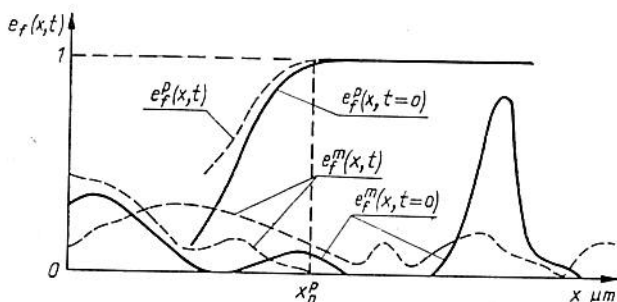
Jeżeli po określonym czasie t filtrowania na elemencie osadzi się pewna ilość zanieczyszczeń i w dowolnym czasie $t_1 > t$ w procesie dalszego filtrowania będzie zawsze spełniony warunek $g(x, t_1) \geq r(x, t_1)$ dla każdego x , to *element filtracyjny* będziemy uważać za *trwały*. Jeżeli ponadto będzie spełniony warunek $g(x, t_1) > r(x, t_1)$ dla każdego x , w którym $e_f(x, t) > 0$, wówczas będziemy mieć do czynienia z *elementem filtracyjnym o dobrej trwałości*. *Bardzo dobrą trwałość wkładu filtracyjnego* określać będzie zależność spełniona dla każdej wartości x , gdy $e_f(x, t_1) \geq e_f(x, t)$.

Niespełnienie któregokolwiek z powyższych warunków prowadzi do określenia wkładu filtracyjnego, jako *wkładu nietrwałego* lub *o pogarszającej się albo słabej (złej) jakości*.

O ile w materiałach filtracyjnych porowatych, przez które przepływa cały strumień cieczy jest spełniony warunek, że istnieje graniczna wartość x , powyżej której charakterystyka odfiltrowania $e_f(x, t)$ przyjmuje zawsze wartość równą 1, tzn. istnieją takie wymiary zanieczyszczeń, które są zatrzymane w całości przez filtr, o tyle w filtrach magnetycznych warunek ten może być nie spełniony. Jest to poważna wada takich filtrów, ponieważ nie zabezpiecza w pełni układu. Ponadto można wysunąć hipotezę, że w jednym cyklu przejścia płynu nie ma żadnej wartości x , dla której $e_f(x) = 1$.

Charakterystyka odfiltrowania filtrów porowatych jest przebiegiem wzrastającym od 0 do 1 od pewnej wartości $x = x_{min}$ do $x = x_{max}$, powyżej której przebieg ten jest bezwzględnie równy 1. Charakterystyka odfiltrowania filtrów magnetycznych jest przebiegiem, co do którego można przypuszczać, że zmienia się od wartości 0 do wartości a ($a \leq 1$), przy czym zakres x od x_{min} do x_{max} jest ciągle zmienny, a poza tym zakresem wartość charakterystyki odfiltrowania jest równa zero. Ponadto nie ma żadnej pewności, że w ww. zakresie wartości punktów charakterystyki odfiltrowania są również zawsze większe od zera. Jest to następna wada takich filtrów.

Na rys. 4.22 przedstawiono przykładowo porównanie przebiegów charakterystyk odfiltrowania filtrów porowatych i filtrów magnetycznych. Na rysunku tym wyjaśniono również, że opero-



Rys. 4.22. Przebiegi charakterystyk odfiltrowania dla $t = 0$ oraz po czasie t w przypadku filtrów porowatych (wskaźnik p) oraz prawdopodobne przebiegi charakterystyk odfiltrowania w przypadku filtrów magnetycznych (wskaźnik m)

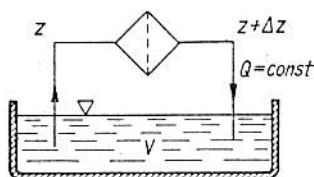
wanie pojęciem charakterystyki odfiltrowania jako funkcji wymiarów x zanieczyszczeń ma sens jedynie przy analizie filtrów porowatych. Dla filtrów magnetycznych, ze względu na ciągle „pływanie” tego przebiegu (w poszczególnych, kolejnych chwilach czasu filtrowania t), jest wystarczająca postać $e_f(x, t)$, gdzie $x = x_{np}$ jest jednym zakresem wymiarów cząstek rozpatrywanym w przedziale, lub inaczej mówiąc, wartością zmiany koncentracji zanieczyszczeń bez wyszczególniania przedziałów wymiarowych. Można jednak mówić o *charakterystyce odfiltrowania filtrów magnetycznych* określanej jako stosunek różnicy ilości cząstek poszczególnych wymiarów przed filtrem w czasie $t = t_a$ i $t = t_b$ (po n cyklach przejścia cieczy) do ilości cząstek w funkcji ich wymiarów w czasie $t = t_a$.

Uśrednione statystycznie wyniki będące u podstaw sposobu filtrowania filtrów magnetycznych przybliżą uzyskany przebieg charakterystyki odfiltrowania do przebiegu, jaki mają filtry porowate. Nawet przy takim założeniu istnieje prawdopodobieństwo, że przebieg charakterystyki odfiltrowania nie osiągnie wartości 1 w żadnym punkcie dla wszystkich wymiarów cząstek zanieczyszczeń. Założymy jednak, że kryterium porównania będzie charakterystyka odfiltrowania jako jedynie obiektywna miara efektywności filtrowania. Sposób porównania polega na stwierdzeniu, ile cykli przepływu pewnej stałej objętości cieczy potrzeba na to, aby uzyskany przebieg charakterystyki odfiltrowania filtrów magnetycznych był najbardziej zbliżony do charakterystyki odfiltrowania filtrów porowatych. Efekt filtrowania jest w przybliżeniu taki sam, gdy nominalne dokładności filtrowania obu rodzajów filtrów będą jednakowe. Nominalna dokładność filtrowania odpowiada takiej wartości wymiarów cząstek zanieczyszczeń, dla której wartość charakterystyki odfiltrowania jest równa ok. 0,95 (lub 0,98).

4.5. Filtrowanie cieczy z mieszaniem w zbiorniku

Ważne ze względu na najczęściej występujące zastosowania jest *filtrowanie w układzie hydraulicznym z ciągłym mieszaniem cieczy w zbiorniku*.

Rozpatrzmy układ złożony ze zbiornika, w którym znajduje się ciecz o objętości V oraz n_0 sztuk cząstek zanieczyszczeń. Przez zainstalowany filtr przepływa ciecz o natężeniu Q (rys. 4.23).



Rys. 4.23. Schemat filtrowania cieczy z mieszaniem w zbiorniku

W przedstawionym układzie założymy, że filtr charakteryzuje intensywność zatrzymywania cząstek $\lambda(t)$. Oznaczając przez z koncentrację cząstek w cieczy, a przez Δz zmianę tej koncentracji po przejściu przez filtr, określimy zależność zmiany koncentracji $z(t)$ w czasie filtrowania przy założeniach stałych parametrów zanieczyszczeń i cieczy roboczej oraz intensywności zatrzymania cząstek $\lambda(t) = \text{const}$, proporcjonalnej do koncentracji zanieczyszczeń, tzn.

dla $\Delta z = -\lambda z$. Dla danych Q, V, n_0, λ poszukiwanymi parametrami będą $z(t)$ i $n(t)$. Koncentracja $z(t)$ dotyczy cieczy w zbiorniku przy założeniu natychmiastowego wymieszania.

Zmiana ilości zanieczyszczeń po przejściu przez filtr

$$\frac{dn(t)}{dt} = Q \Delta z \quad (4.238)$$

lub

$$\frac{dn(t)}{dt} = -\lambda Q z \quad (4.239)$$

Dzieląc stronami przez V otrzymamy

$$\frac{dz(t)}{dt} = -\frac{\lambda Q}{V} z \quad (4.240)$$

W chwili $t = 0$ jest $z = n_0/V$, czyli

$$z(t) = \frac{n_0}{V} \exp\left(-\frac{\lambda Q}{V} t\right) \quad (4.241)$$

albo oznaczając $n_0/V = z_0$, otrzymamy

$$\frac{z(t)}{z_0} = \exp\left(-\frac{\lambda Q}{V} t\right) \quad (4.242)$$

Jeśli przez T oznaczymy czas cyklu przejścia całkowitej objętości cieczy V w zbiorniku, to $T = V/Q$, a wyrażenie przyjmie postać

$$\frac{z(t)}{z_0} = \exp\left(-\lambda \frac{t}{T}\right) \quad (4.243)$$

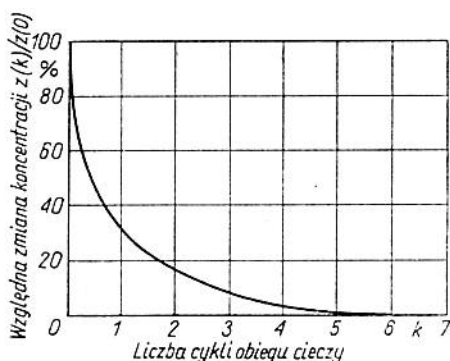
Oznaczając czas $t = kT$, gdzie $k =$ liczba cykli, otrzymamy

$$z(kT) = z_0 \exp(-\lambda k) \quad (4.244)$$

Dla filtru absolutnego, czyli takiego, w którym po przejściu cieczy następuje zatrzymanie wszystkich zanieczyszczeń, czyli dla $\lambda = 1$, i przy założeniu $T = 1$ otrzymamy (rys. 4.24):

cykl „zerowy”	— 100%	koncentracji zanieczyszczeń
po pierwszym cyklu	— 36,8%	„ „
po drugim cyklu	— 13,5%	„ „
po trzecim cyklu	— 5%	„ „
po czwartym cyklu	— 1,8%	„ „
po piątym cyklu	— 0,67%	„ „

Zauważmy, że włączenie filtru absolutnego w omawianym tutaj układzie, umożliwiła dopiero po pięciu cyklach obiegu cieczy oczyszczenie do stanu poniżej 1% koncentracji początkowej zanieczyszczeń.



Rys. 4.24. Zmiana koncentracji zanieczyszczeń w cieczy filtrowanej przez filtr absolutny

Dokonyjąc normalizacji zależności na zmianę koncentracji otrzymamy

$$z(k) = \lambda z_0 \exp[-\lambda k] \quad (4.245)$$

lub

$$\int_0^k z(k) dk = z_0 [1 - \exp(-\lambda k)] \quad (4.246)$$

Czyniąc założenia jak wyżej, wyznaczmy zależność zmiany koncentracji zanieczyszczeń w zbiorniku z cieczą w przypadku, gdy intensywność zatrzymywania cząstek jest nieznaną funkcją zależną tylko od koncentracji zanieczyszczeń.

Wykorzystując zależność (4.238) oraz rozważany teraz przypadek, w którym $\Delta z = \lambda[z(t)]$, otrzymamy

$$\frac{d \frac{n(t)}{V}}{dt} = \frac{dz(t)}{dt} = \frac{Q}{V} \lambda[z(t)] \quad (4.247)$$

a stąd

$$z(t) = \frac{n_0}{V} - \frac{Q}{V} \int_0^t \lambda[z(t)] dt \quad (4.248)$$

I wreszcie, przy założeniu, że intensywność zatrzymania zanieczyszczeń $\lambda(t)$ zależy od koncentracji zanieczyszczeń w cieczy i od liczby N cząstek zatrzymanych, otrzymamy relację:

$$N(t) = n_0 - Vz(t); \quad z(t) = \frac{n(t)}{V} \quad (4.249)$$

i na podstawie poprzednich zależności

$$\frac{dn(t)}{dt} = Q\lambda[z(t), N(t)] \quad (4.250)$$

przy spełnieniu w każdej chwili warunku

$$N(t) + n(t) = n_0 \quad (4.251)$$

Zatem

$$\frac{dz(t)}{dt} = \frac{Q}{V} \lambda[z(t), N(t)] \quad (4.252)$$

oraz

$$z(t) = \frac{n_0}{V} - \frac{Q}{V} \int_0^t \lambda\{z(t), [n_0 - Vz(t)]\} dt \quad (4.253)$$

Wzory powyższe umożliwiają ocenę i przewidywania efektywności filtrowania w aspekcie dynamiki procesu filtrowania układów hydraulicznych stacji zasilania.

Rozdział 5. METODY I URZĄDZENIA BADAWCZE

5.1. Klasyfikacja metod badań filtrów i zanieczyszczeń płynów

Wśród metod badań mających na celu określenie własności filtracyjnych filtrów można wyróżnić z jednej strony metody badań cząstek zanieczyszczeń (próbek płynu, osadu, urządzenia plynowego itp), z drugiej zaś — metody badań filtrów.

Metody badań własności filtracyjnych filtrów płynów roboczych można podzielić na kilka grup w zależności od metod pomiarowych opierając się przy tym na rozpowszechnionych obecnie sposobach i urządzeniach pomiarowych. Są to następujące metody badań:

- 1) metody oparte na badaniu wkładów porowatych,
- 2) metody oparte na badaniach cząstek zanieczyszczeń w płynie przed i za filtrem oraz na badaniach osadu usuniętych z płynu cząstek,
- 3) metody oparte na funkcjonowaniu urządzenia plynowego,
- 4) metody oparte na testach kontrolnych,
- 5) inne metody.

W celu zapoznania się z systematyką metod pomiarowych, dokonamy dodatkowej klasyfikacji w zależności od zakresów wymiarowych cząstek oraz od sposobów badania tych cząstek ze szczególnym zwróceniem uwagi na metody ich usuwania z płynu. Jest to klasyfikacja ogólna, ponieważ każda z metod badania filtrów łączy się bezpośrednio lub pośrednio z badaniem zanieczyszczeń płynu. Klasyfikację metod usuwania i metod analizy charakterystyk cząstek zanieczyszczeń przedstawiono na rys. 5.1. Wyodrębniono w niej również równoważne parametry wymiarowe cząstek: prędkość sedymentacji grawitacyjnej w powietrzu i wodzie oraz współczynnik dyfuzji cząstek.

Poniżej podano komentarz do wyodrębnionych metod i sposobów postępowania oraz urządzeń pomiarowych. W dalszych punktach rozdziału omówiono szczegółowo różne metody i urządzenia wykorzystywane w badaniach filtrów i czystości płynów roboczych. Zwrócono szczególną uwagę na metodę kontrastu ele-

ktrycznego, i stosowane przy tym urządzenia, jako że ten kierunek jest obecnie najbardziej rozpowszechniony. Ponadto omówiono ważniejsze cechy metod kolmatacyjnych ze względu na ich pionierski rozwój w Polsce.

Poniższy komentarz dotyczy haseł klasyfikacji zawartych na rys. 5.1. Oznaczeniom numerowym na rysunku odpowiadają kolejne oznaczenia punktów komentarza. Objasnienia ogólne: linią przerywaną zaznaczono zakresy, które z różnych względów są rzadko stosowane. Niektóre z nich są zakresami tylko teoretycznymi. Na przykład górny zakres pomiarowy mikroskopu skanującego (nazywanego również wybierającym lub analizującym)¹⁾ jest w zasadzie nieograniczony; z przyczyn ekonomicznych mikroskopu skanującego nie stosuje się do cząstek o wymiarze ponad 1 mm. Cząstki większe mogą być bowiem oznaczone przy zastosowaniu metody organoleptycznej lub innych prostszych metod.

1) *Metoda ultradźwiękowa*. Polega ona na tym, że pod wpływem działania fal ultradźwiękowych drobne cząstki zanieczyszczeń łączą się w duże cząstki, które można oddzielić za pomocą zwykłych filtrów.

2) *Oddzielacze odśrodkowe*. Urządzeniami najczęściej stosowanymi są *cyklony*. W cyklonach zanieczyszczony cząstkami gaz wchodzi prostopadle do walcowej lub stożkowej komory w jednym lub kilku punktach i wychodzi przez otwór osiowy. Cząstki zanieczyszczeń pod wpływem sił bezwładności poruszają się w kierunku ścianki zewnętrznej, skąd kieruje się je do zbiornika. W urządzeniu tym przyspieszenie grawitacyjne występuje łącznie z przyspieszeniem odśrodkowym.

3) *Tkaninowe oddzielacze pyłu*. Wymiary porów tkaniny, przez którą przepuszcza się gaz, zazwyczaj kilkakrotnie przewyższają wymiary cząstek. Dlatego w początkowym okresie działania urządzenia efektywność oczyszczania (analogicznie do efektywności filtrowania) jest mała aż do chwili, gdy na tkaninie wytworzy się dostatecznej grubości warstwa zatrzymanych cząstek. Zazwyczaj okres ten trwa kilka minut czy nawet sekund. Po wytworzeniu się pomocniczej warstwy efektywność oczyszczania przewyższa 99%.

4) *Warstwy nasadkowe*. Przykładem jest *filtr Lincha* o warstwie nasadkowej (precoat) ze żwiru, na którym są osadzone cząstki zanieczyszczeń. Cząstki te następnie są usuwane elektrostatycznie.

5) *Oddzielacze mechaniczne* zwane inaczej *grawitacyjnymi*. Są to najprostsze urządzenia pochłaniające zanieczyszczenia gazu. Wadą ich jest to, że wraz ze zmniejszeniem średnicy usuwanych cząstek wzrastają gwałtownie wymiary urządzenia.

¹⁾ Wyjaśnienie operacji skaningu patrz poz. 19 p. 5.4.2.

6) *Elektryczne czynniki strącające*. Są to tzw. *filtry elektryczne*. W urządzeniu tym gaz zostaje zjonizowany i cząstki są oddzielane w polu elektrostatycznym.

7) *Płukanie wodą*. Stosuje się do czyszczenia olejów napędowych i produktów destylacji.

8) *Metoda ciśnieniowa*. Stosowane ciśnienie $210 \div 350$ at. Metoda ta uniemożliwia zmniejszenie wagowego udziału zanieczyszczeń w cieczy, a jedynie powoduje rozdrobnienie wtrąconych cząstek.

9) *Oddziaływanie czynników koagulujących*. Proces trwa około miesiąca.

10) *Osadzenie zanieczyszczeń*. Cząstki o wymiarach mniejszych od $15 \div 20 \mu\text{m}$ nie osadzają się w wyniku działania w zbiorniku prądów unoszenia.

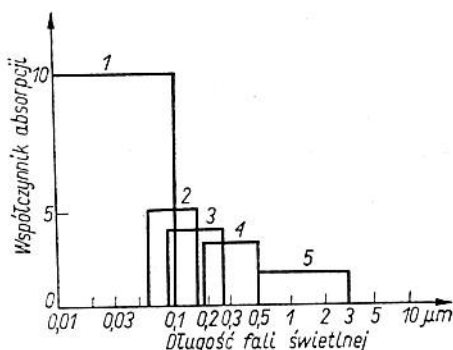
11) *Mikroskop optyczny*. Urządzenie oparte na zmniejszeniu amplitudy fali świetlnej przy wzroście pochłaniania (absorpcji) światła przez substancję danego mikroobektu. Obowiązuje przy tym podstawowa zależność

$$\Phi = \Phi_0 \exp(-kx) \quad (5.1)$$

gdzie: Φ — strumień świetlny przechodzący przez mikroobekt, Φ_0 — strumień światła padającego, k — współczynnik pochłaniania danej substancji, x — grubość warstwy absorpcyjnej.

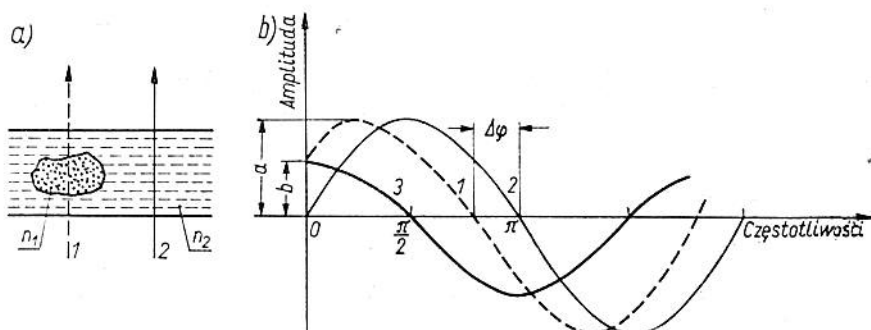
Pomiary te są nazywane fotometrycznymi pomiarami mikroobektów. Na rys. 5.2. przedstawiono wykres widmowego pochłaniania światła w przypadku różnych związków chemicznych wchodzących w skład mikroobektów.

Zdolność rozdzielcza mikroskopu optycznego jest równa połowie długości fali świetlnej.



Rys. 5.2. Wykres pochłaniania światła: 1 — cząsteczki, 2 — związki nieorganiczne, 3 — związki organiczne, 4 — cykliczne związki organiczne, 5 — związki organiczne zespolone (kompleksowe)

12) *Mikroskop z ciemnym polem.* U podstaw tej metody leży zmiana fali świetlnej po przejściu przez substancję mikroobiektu. Na rys. 5.3. przedstawiono zasadę zastąpienia zmian fazowych



Rys. 5.3. Zastąpienie zmian fazowych zmianami amplitudowymi; n_1, n_2 — współczynniki załamania światła, 1 — promień przechodzący przez substancję mikroobiektu o współczynniku n_1 , 2 — promień nieprzechodzący przez mikroobiekt, $\Delta\varphi$ — przesunięcie fazowe promienia 1 względem 2, d — grubość mikroobiektu, λ — długość fali świetlnej

zmianami amplitudowymi. Wielkości występujące na rysunku są związane zależnościami

$$\Delta\varphi = (n_1 - n_2) \frac{d}{\lambda}, \quad \Phi = a^2 + b^2, \quad \text{gdy} \quad a \gg b, \quad \Phi = a^2 \quad (5.2)$$

Amplituda b wzrasta wraz ze wzrostem przesunięcia fazowego. Zdolność rozdzielcza mikroskopu z ciemnym polem wynosi $0,5 \div 0,7 \mu\text{m}$, mikroskopu z kontrastem fazowym — $0,3 \div 0,5 \mu\text{m}$, a mikroskopu interferencyjnego: długość i szerokość $0,3 \div 0,5 \mu\text{m}$, grubość $0,03 \mu\text{m}$.

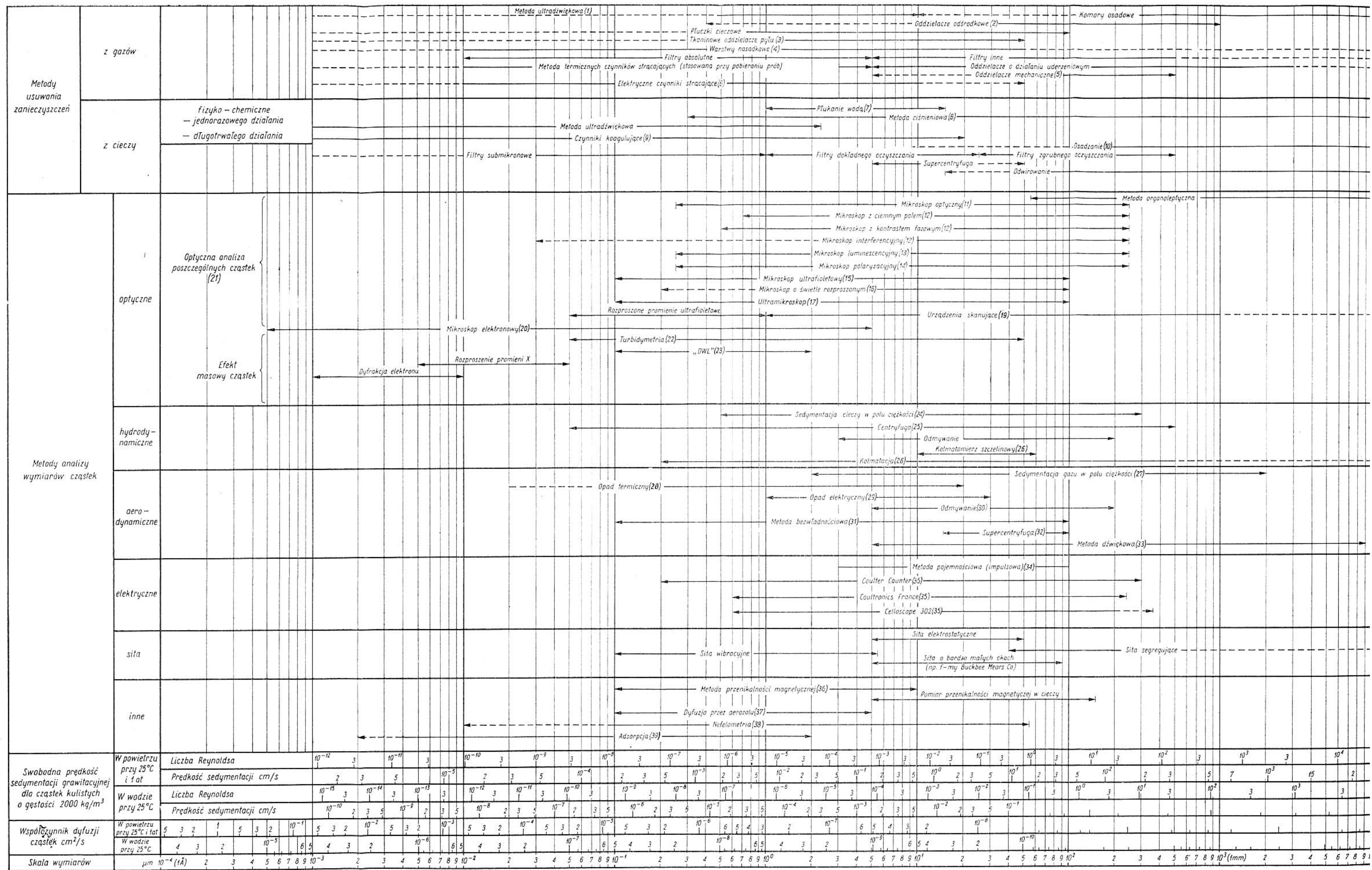
13) *Mikroskop luminescencyjny.* Podstawą analizy fotoluminescencyjnej jest zmniejszenie częstotliwości fali wtórnej w stosunku do pierwotnej oświetlającej mikroobiekt. Zdolność rozdzielcza mikroskopu luminescencyjnego $0,2 \div 0,3 \mu\text{m}$.

14) *Mikroskop polaryzacyjny.* Mikroskopem tym można analizować mikroobiekty mające własności polaryzacyjne. Zalicza się do nich prawie wszystkie mikroobiekty biologiczne, kryształy, odłamki górskich skał, chemikalia, tzn. wszystkie te substancje, które charakteryzują się wysokim stopniem molekularnej orientacji.

Kąt polaryzacji

$$\alpha = \frac{c}{\lambda} d \quad (5.3)$$

gdzie: c — wielkość stała dla danej substancji, λ — długość fali świetlnej, d — grubość mikroobiektu.



Rys. 5.1. Klasyfikacja metod usuwania i analizy charakterystyk cząstek

Zdolność rozdzielcza mikroskopu polaryzacyjnego wynosi $0,2 \div 0,3 \mu\text{m}$.

15) *Mikroskop ultrafioletowy*. Wykrywanie fotoelektryczne poszczególnych cząstek krążących w analizowanej płaszczyźnie promieniami ultrafioletowymi. Dokonując analizy wysokości impulsów z fotoelementu wyzyskuje się rozkład wymiarów cząstek. Metoda charakteryzuje się dużą szybkością pomiaru dzięki zastosowaniu fotopowielaczy (multicaneli). Możliwa jest automatyzacja i ciągła analiza.

16) *Mikroskop o świetle rozproszonym*. Stosowany przede wszystkim do badania układów koloidalnych. Zasada pomiaru opiera się na *zjawisku Tyndalla*, tj. efekcie rozpraszania na boki światła przechodzącego przez układ koloidalny. Występowanie tego zjawiska świadczy o koloidowej budowie danego układu i ułatwia jego ilościowe scharakteryzowanie. Na podstawie natężenia światła bocznie rozproszonego można często wnioskować o strukturze układu, zwłaszcza przez porównanie różnie sporządzonych próbek z tego samego materiału. Ilościowe porównanie natężenia światła ugiętego na próbkach przygotowanych w jednakowy sposób może służyć do oznaczenia stężenia cząstek w układzie koloidalnym. Z zależności między natężeniem i stopniem polaryzacji światła od kierunku obserwacji oraz od częstotliwości użytego światła wyciąga się wnioski dotyczące natury zdyspergowanych cząstek, ich wielkości i kształtu. W izodispersyjnych układach cząstek kulistych pomiary tego rodzaju mogą służyć do bezpośredniego oznaczania wielkości cząstek. Liczba cząstek wynika wówczas z natężenia rozproszonego światła. Pomiary te stosuje się zarówno przy badaniu koloidów, które przedstawiają fazy zdyspergowane, jak również przy badaniu mikrocząsteczek. Możliwa jest przy tym automatyczna i ciągła analiza oraz uzyskanie dużej szybkości pomiaru przez zastosowanie fotopowielaczy.

17) *Ultramikroskop*. Metoda pomiaru polega na mikroskopowej analizie światła Tyndalla, tzn. na badaniu fal światła ugiętego wytwarzanych przez cząstki o średnicy mniejszej od długości fal światła oświetlającego lub jej równej. Przykłady stosowania: ultramikroskop szczelinowy wg Siedentopfa i Zsigmondy'ego, ultramikroskop immersyjny Zsigmondy'ego.

18) *Metoda rozproszonych promieni ultrafioletowych*. Umożliwia przeprowadzenie analizy mikroobektów rzędu od $0,5$ do $10 \mu\text{m}$.

19) *Urządzenia skanujące*. Schemat mikroskopu skanującego przedstawiono na rys. 5.4. Przyrząd ten jest powiązaniem urządzenia optycznego oraz przetwornika wideoelektrycznego. Umożliwia on przekształcenie obrazu optycznego w zbiór sygnałów

elektrycznych, a zatem — wprowadzenie informacji do maszyny liczącej. Każdej cząstce analizowanej jest przypisany jeden lub kilka impulsów. Zatem operacja skaningu polega na kolejnym przeszukiwaniu pola wg zadanego algorytmu działania.

Trudności wynikające z konstrukcji mikroskopu skanującego są związane z koniecznością uzyskania informacji od elementu o powierzchni $10^{-7} \div 10^{-4} \text{ mm}^2$ przy jednoczesnym rozróżnialnym stosunku: sygnał/ /szum. Jest to zadanie trudne i często intensywność oświetlenia uzyskanego z wolnych źródeł światła okazuje się niedostateczna.

Przykłady urządzeń: SEL (ZSRR), Casella (firmy Electronics Ltd., Wielka Brytania). EEL (firmy Evens Electro Selenium Ltd., Wielka Brytania), Quantimet (firmy Metals Research Ltd., Cambridge, Wielka Brytania) Microvideomat (firmy Opton NRF) i inne.

Rys. 5.4. Schemat blokowy mikroskopu skanującego; 1 — źródło światła, 2 — urządzenie optyczne koncentrujące energię świetlną na preparacie, 3 — preparat, 4 — mikroskop, 5 — przysłona przesuwająca się w płaszczyźnie obrazu, 6 — foteoelement, 7 — elektryczny analizator i licznik impulsów

20) *Mikroskop elektronowy*. Wiązka elektronów poruszając się między dwiema elektrodami, przy różnicy potencjałów wynoszącej kilkadziesiąt tysięcy woltów, po napotkaniu na swej drodze mikroobiekту o dostatecznie małej grubości przenika przez niego ulegając ugięciu. Część ugiętej wiązki zbiera układ soczewek elektronowych. Obraz jest na ekranie fluoryzującym lub kliszy fotograficznej.

21) *Optyczna analiza poszczególnych cząstek*. Rozróżnia się metody optyczne, fotoelektryczne, termoelektryczne (pomiar za pomocą termopar lub termostatów), bolometryczne (pomiar zmian oporu pod wpływem zmian temperatury) i fotograficzne. Obecnie coraz częściej stosuje się metody fotoelektryczną, które mają tu przewagę nad optycznymi, że uzyskuje się większą pewność i czułość pomiarów również poza widmem widzialnym, przede wszystkim w ultrafiolecie.

22) *Turbidymetria*. Oznaczanie ilości zanieczyszczeń przez zmętnienia. W połączeniu z metodą sedymentacji uzyskuje się rozkład wymiarów cząstek. Na rynku znajdują się przyrządy następujących firm: Cenco, Eagle Picher, Klett Sumerson, Backmann B.

23) *Metoda DWL*. Polega ona na badaniu rozkładu kąтового barw i polaryzacji światła rozproszonego. Zapewnia uzyskanie średniego wymiaru cząstek.

24) *Sedymentacja cieczy w polu ciężkości*. Pierwszym warun-

kiem skutecznego zastosowania sedymentacji do oznaczania składu cząstek układu dyspersyjnego jest to, aby układ na początku sedymentacji był w stanie równomiernego rozdziału poszczególnych cząstek w przestrzeni sedymentacyjnej oraz aby podczas sedymentacji nie zachodziło w wyniku koagulacji wzajemne oddziaływanie cząstek na siebie. Przy spełnieniu powyższych warunków każda cząstka sedymentuje z szybkością zależną od jej wielkości. Grupa cząstek o tej samej wielkości zachowuje początkowe stężenie podczas sedymentacji w swojej przestrzeni opadania. Do wykrywania skupisk cząstek można użyć światła rozproszonego lub pochłanianego. Rejestracja fotograficzna lub automatyczna (np. automatyczny rejestrator f-my Bostock).

25) *wirówka (centryfuga)*. Urządzenie, za pomocą którego można ilościowo wyznaczyć sedymentację w polu działania siły odśrodkowej (np. f-my Scharples Dietert).

26) *Kolmatomierz szczelinowy*. Podany zakres pomiarowy dotyczy tylko urządzenia, którego modele zostały opracowane w Polsce. Zasada działania kolmatomierza jest oparta na zjawisku kolmatacji. Zarówno zjawisko to, jak i zasadę działania kolmatomierza szczelinowego omówiono dalej. Mierzenie cząstek o wymiarze ponad $100 \div 200 \mu\text{m}$ może być obarczone dużym błędem wskutek sedymentacji. Dlatego zakres powyżej $200 \mu\text{m}$ jest oznaczony linią przerywaną.

27) *Sedymentacja gazów w polu ciężkości*. Aerozole opadające są rejestrowane na szalce wagi.

28) *Opad termiczny*. Aerozole krążące między płytkami o różnych temperaturach osadzają się na zimniejszej płytce. Przy zastosowaniu tej metody uzyskuje się rozkład wymiarów cząstek. Przykład: analizator f-my Scharples.

29) *Opad elektryczny*. Zjonizowane aerozole krążąc między płytkami o różnych potencjałach osadzają się na nich. Stosując tę metodę uzyskuje się rozkład wymiarów cząstek.

30) *Odmywanie*. Metoda z wykorzystaniem cieczy umożliwiająca wyznaczanie wymiarów cząstek od 5 do ok. $100 \mu\text{m}$. Przykłady: urządzenia f-my Haultain i American Inst. Co.

31) *Metoda bezwładnościowa*. Badane są tory cząstek na wyjściu z centryfugi oddzielającej. Przykłady: urządzenia f-my Bahco, oddzielacz wymiarowy f-my Dietert.

32) *Supercentryfuga*. Duża wydajność rzędu $11200 \div 1000 \text{ kg/h}$. Przykłady: centryfuga segregująca f-my Scharples, Dietert i Sawyer and Walton.

33) *Metoda dźwiękowa*. Polega ona na fotograficznej rejestracji amplitudy drgań cząstek w polu fal dźwiękowych.

34) *Metoda pojemnościowa (impulsowa)*. Jest ona oparta na określonej zależności między wymiarem ciała a jego elektryczną

pojemnością. Badanie wymiarów cząstek polega tu na analizie wpływu niektórych wielkości elektrycznych na przekazanie lub odebranie ładunku elektrycznego przez cząstkę.

35) *Metoda kontrastu elektrycznego.* Zasada działania urządzeń jest oparta na zjawisku kontrastu elektrycznego, polegającego na zmianie oporu właściwego elektrolitu wraz ze zmianą objętości zawartych w nim wtrąceń. Część zakresu pomiarowego szwedzkiego aparatu Celloscope 302 oznaczono linią przerywaną, ponieważ na tym odcinku urządzenie pracuje z dużo mniejszą dokładnością, w związku z tym zaleca się wykorzystanie urządzenia w zakresie oznaczonym linią ciągłą. Zasadę działania tych urządzeń, jak i zjawisko kontrastu elektrycznego omówiono dalej. Omówienia jak i porównania urządzeń wykorzystujących zjawisko kontrastu elektrycznego dokonano w następnych punktach rozdziału.

36) *Metoda przenikalności magnetycznej.* Polega ona na pomiarze przenikalności magnetycznej w zgromadzonych na płycie cząstkach. Wymiarowania dokonuje się za pomocą sit. Przykłady: urządzenia firmy Fisher, Permeametr typu Blaine, Precision Scientific Co., Perameatr Spillane.

37) *Dyfuzja przez aerozole.* Metoda stosowana do analizy zarówno zawiesin jak i koloidów. Polega na pomiarze rytmu przenikania aerozoli przez ścianki.

38) *Nefelometria.* Może mieć zastosowanie do oznaczania wielkości cząstek mikroobektów o niskim stopniu dyspersji i aerozoli, gdzie spadek intensywności światła przechodzącego zmniejsza się proporcjonalnie do powierzchni cząstek. Metoda ta jest często łączona z sedymentacją. Metoda pomiarowa jest oparta na wykorzystaniu zjawiska Tyndalla.

39) *Adsorpcja.* Stan równowagi adsorpcyjnej odznacza się tym, że pewnemu określone mu stanowi, charakteryzującemu się temperaturą, stężeniem, wielkością powierzchni (stopniem dyspersji i morfologią adsorbentu) odpowiada określona ilość adsorbowanej substancji. Przy zastosowaniu tej metody nie uzyskuje się rozkładu wymiarów mikroobektów.

5.2. Metody wyznaczania efektywności filtrowania na podstawie badań przegrody porowatej

5.2.1. Uwagi ogólne

Wyprowadzone i opisane poprzednio zależności określające równowagę charakterystyki odfiltrowania i dystrybuanty hydrodynamicznej przegrody filtracyjnej umożliwiają analityczno-

-doświadczalne wyznaczenie efektywności filtrowania. Metodę wyznaczenia charakterystyki odfiltrowania, jako podstawowego kryterium oceny efektywności filtrowania płynów roboczych, oparto w zakresie analitycznym na interpretacji fizycznej pojęcia dystrybuanty hydrodynamicznej i wykorzystaniu odpowiednich zależności, natomiast w zakresie doświadczalnym oparto na niezbędnych badaniach laboratoryjnych w celu uzyskania informacji o ocenianej przegrodzie filtracyjnej. Należy zaznaczyć, że opisany tutaj doświadczalny zakres metody dotyczy przegród filtracyjnych, dla których można zastosować metody porometrii przy użyciu cieczy testowych o znanym współczynniku napięcia powierzchniowego, zwilżających materiał przegrody filtracyjnej.

Opracowana tutaj metoda badania polega na pomiarze natężenia przepływu gazu Q_0 i spadku ciśnienia p na przegrodzie filtracyjnej „suchej”, a więc na wyznaczeniu charakterystyki przepływowej oraz pomiarze spadku ciśnienia p i odpowiadającego mu natężenia Q przepływu gazu przenikającego przez przegrodę filtracyjną nasączoną cieczą testową. Wyznaczenie charakterystyki odfiltrowania następuje w wyniku obliczenia jej przebiegu na podstawie zależności $Q_0 = f_1(p)$ oraz $Q = f_2(p)$. Metodę wyznaczenia można określić jako półempiryczną „dwóch charakterystyk” (dwóch przepływów).

5.2.2. Podstawy teoretyczne

Metodę wyznaczenia opierać będziemy na zależności określającej charakterystykę odfiltrowania.

$$e_f(x, t) = \int_0^x k(y, t) dy \quad (5.4)$$

przy czym

$$k(y, t) = \Xi_y[k_A(y, t)] \quad (5.5)$$

a z określenia funkcji Ξ wynika, że

$$k_A(y, t) = k(y, t) \int_0^\infty k_A(y, t) dy = k(y, t) K_A(y, t) \quad (5.6)$$

gdzie: $k(y, t)$ — gęstość rozkładu natężenia przepływu płynu przez pory y w danej chwili czasowej t (gęstość hydrodynamiczna), $k_A(y, t)$ — gęstość dyfektywna natężenia przepływu płynu przez pory y , które w danej chwili czasu t są otwarte, y — wymiar poru, x wymiar zanieczyszczenia

$$\Xi_x f(x, \beta) = \frac{f(x, \beta)}{\int_{-\infty}^{+\infty} f(x, \beta) dx} \quad (5.7)$$

Sens fizyczny $K_A(y, t)$ można wyjaśnić na podstawie następującej relacji słusznej w przypadku, gdy spadek ciśnienia na przegrodzie filtracyjnej w czasie t jest utrzymany na stałym poziomie

$$Q(t) = Q(t=0) K_A(t) \quad (5.8)$$

gdzie: $Q(t)$ — całkowite natężenie przepływu płynu przez przegrodę filtracyjną w danym czasie t , $Q(t=0)$ — natężenie przepływu płynu przez przegrodę filtracyjną w czasie $t=0$.

Jeżeli założymy stan przepływu płynu przez przegrodę filtracyjną taki, że

$$Q(p) = mp \quad (5.9)$$

gdzie: m — współczynnik stały,

co odpowiada przepływowi laminarnemu, to zależność (5.8) będzie słuszna dla dowolnego stałego spadku ciśnienia p na przegrodzie filtracyjnej. Wynika stąd również fakt, że zbadanie zależności $Q(p, t=0)$ umożliwia „określenie” przegrody filtracyjnej w sensie sumarycznego przepływu przez wszystkie pory, a więc wyznaczenie współczynnika m . Na ogół badanie zależności $Q(p, t=0)$, którą oznaczymy przez Q_0 mając na myśli przepływ przez przegrodę filtracyjną płynu bez cząstek zanieczyszczeń, nie sprawia większych trudności pomiarowych. Badanie natomiast zależności $Q(p, t)$ w celu wyznaczenia $e_f(x, 0)$ jest możliwe przy zastosowaniu następującego postępowania. Wprowadzimy do cieczy cząstki zanieczyszczeń o wymiarze x_{min} , tak aby podczas filtrowania nastąpiło zatkanie wszystkich porów o wymiarze $y \leq x_{min}$. Czas filtrowania t będzie określony stałym spadkiem ciśnienia p dla danego natężenia przepływu Q przez wszystkie pory o wymiarze $y > x_{min}$. Wymiar cząstek x_{min} wybieramy taki, aby nastąpiła wyraźna zmiana stosunku Q/Q_0 . W ten sposób dokonujemy „doświadczalnie” podziału nieznaney dystrybuanty hydrodynamicznej przegrody filtracyjnej na część dotyczącą porów otwartych $k_A(y > x_{min})$ o wymiarach większych niż x_{min} , przez które przepływa ciecz o natężeniu Q i na część dotyczącą porów całkowicie zatkaanych o gęstości defektywnej $k_B(y \leq x_{min})$. Natężenie przepływu Q_0 dotyczyło funkcji gęstości $k(y)$. Zatem, opierając się na podziale gęstości hydrodynamicznej porów na dwie gęstości defektywne dotyczące odpowiednio porów otwartych i zatkaanych

$$k(y) = k_A(y) + k_B(y) \quad (5.10)$$

przy narzuceniu określonych wymiarów cząstek zanieczyszczeń wprowadzanych do cieczy filtrowanej i zaniechaniu „czasu dojścia” do liniowej zależności $Q(p) = mp$, otrzymamy na podstawie (5.6) wartość punktu charakterystyki odfiltrowania odpowiadającą $x = x_{min}$

$$Q = Q_0 \left[\int_0^{\infty} k(y) dy - \int_0^{x_{min}} k(y) dy \right] \Big|_p = \text{const} \quad (5.11)$$

$$Q = Q_0 [1 - e_f(x_{min})] \Big|_{p = \text{const}} \quad (5.12)$$

$$e_f(x_{min}) = 1 - \frac{Q}{Q_0} \Big|_{p = \text{const}} \quad (5.13)$$

Wprowadzając do cieczy cząstki zanieczyszczeń kolejno o wymiarach x w zakresie zwiększającym się do x_{max} , przy którym $Q \rightarrow 0$, otrzymamy następujące po sobie punkty charakterystyki odfiltrowania.

Metoda postępowania opisana powyżej sprawia pewne trudności laboratoryjne ze względu na konieczność filtrowania i wprowadzenia cząstek zanieczyszczeń o znanych wymiarach. Nie mniej jednak nie wymaga ona przeprowadzenia pomiarów związanych z liczeniem ilości i rozkładu wymiarowego cząstek zanieczyszczeń w cieczy.

Lepszą z punktu widzenia szybkości pomiarów jest metoda wyznaczania charakterystyki odfiltrowania z dwu przepływów, w której zależność $Q_0 = f_1(p)$ dotyczy przepływu gazu przez „suchą” przegrodę filtracyjną, natomiast $Q = f_2(p)$ określa zależność natężenia przepływu gazu przez pory otwarte i otwierające się podczas zwiększenia spadku ciśnienia na przegrodzie filtracyjnej nasyconej czystą, zwilżającą ciecz testową o znanym współczynniku napięcia powierzchniowego. Ciecz testowa jest utrzymywana w porach wskutek działania sił napięcia powierzchniowego i dla jej oswobodzenia potrzebne jest ciśnienie zależne od wymiaru poru (wzór Barusa-Bechholda)

$$p = \frac{A}{y} = \frac{2\delta \cos \Theta}{y} \quad (5.14)$$

gdzie: $A = \text{const}$ — współczynnik ujmujący wartość napięcia powierzchniowego δ i kąta zwilżania Θ , y — promień poru o kształcie cylindrycznym.

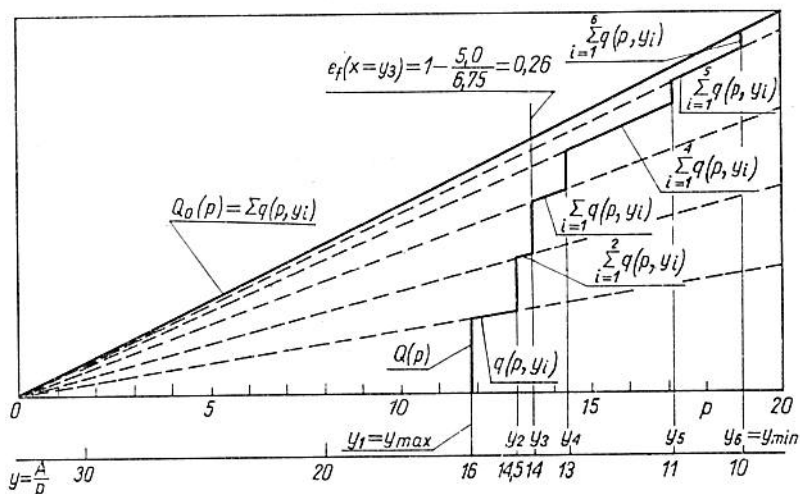
Przyjmując, że otwieranie porów pod wpływem zwiększającego się ciśnienia odpowiada przyjętemu poprzednio w pracy modelowi procesu filtrowania, lecz przebiega w odwrotnej kolejności, tzn. otwieranie zatkniętych porów od największych do coraz mniejszych, można wykorzystać zależność (5.11) do określenia charakterystyki odfiltrowania

$$Q = Q_0 \left[\int_0^{y_{max}} k(y) dy - \int_0^y k(y) dy \right] \quad (5.15)$$

$$e_f(x=y) = 1 - \frac{Q}{Q_0} \Big|_{p = \frac{A}{y}} \quad (5.16)$$

Różnica w zapisie wzorów (5.13) i (5.16) polega na przyjętym założeniu, że określony wzorem (5.14) wymiar poru y nominalnie odpowiada wymiarowi cząstki zanieczyszczenia x w charakterystyce odfiltrowania, natomiast $p = A/y$ we wzorze (5.16) jest wartością zależną od y i musi odpowiadać takiej samej wartości p w zależności $Q_0 = f_1(p)$. Określenie $e_f(x)$ za pomocą wzoru (5.13) nie wymagało tego warunku.

Na rys. 5.5 przedstawiono wykresy będące interpretacją założeń teoretycznych metody pomiarowej. Rozważono tutaj przegrodę filtracyjną utworzoną z 6 porów o umownych wymiarach y równych 10; 11; 13; 14; 14,5; 16 μm . Charakterystyka $Q_0 = Q_0(p)$ określa zależność przepływu przez całą przegrodę i jest sumą przepływów przez poszczególne pory w funkcji spadku ciśnienia. Liniami przerywanymi określono taką samą zależność oddzielnie dla poszczególnych porów, przy czym linie o wzrastającym nachyleniu stanowią zależność sumaryczną przepływu od $Q = Q(p)$ dla poru największego do $Q = Q(p)$ dla porów o coraz mniejszych wymia-



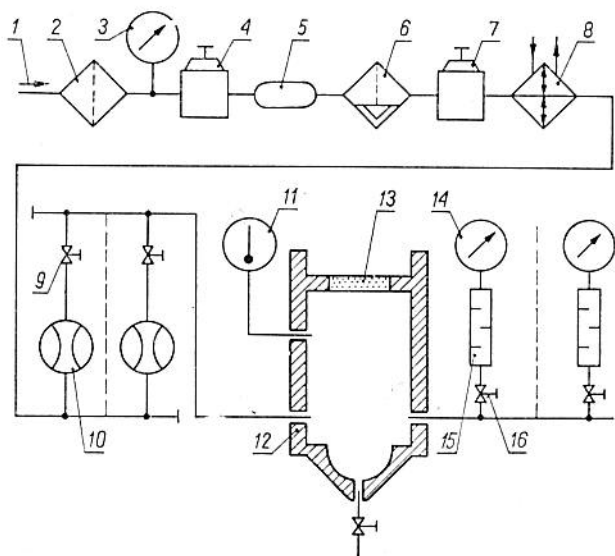
Rys. 5.5. Interpretacja graficzna metody dwóch charakterystyk

rach. Grubą linią łamaną oznaczono zależność $Q = Q(p)$ uzyskaną przy kolejnym otwieraniu się porów zgodnie z zależnością $y = A/p$ dla przegrody filtracyjnej nasyconej cieczą testową i dla $A = \text{const}$. Wyznaczenie punktów charakterystyki $e_f(x_i = y_i)$ polega na znalezieniu stosunku $(Q_0 - Q)/Q_0$ odpowiadającego wartości $p = A/y_i$. Dla poru o wymiarze $y_i = y_3 = 14 \mu\text{m}$, wartość tego stosunku wynosi 0,26, a zatem otrzymujemy punkt charakterystyki odfiltrowania $e_f(14) = 0,26$.

5.2.3. Metoda pomiaru

Przedstawione w poprzednim punkcie wnioski z rozważań teoretycznych są podstawą metody wyznaczania charakterystyki odfiltrowania na podstawie dwu charakterystyk (przepływów) przy użyciu prostej i typowej aparatury laboratoryjnej.

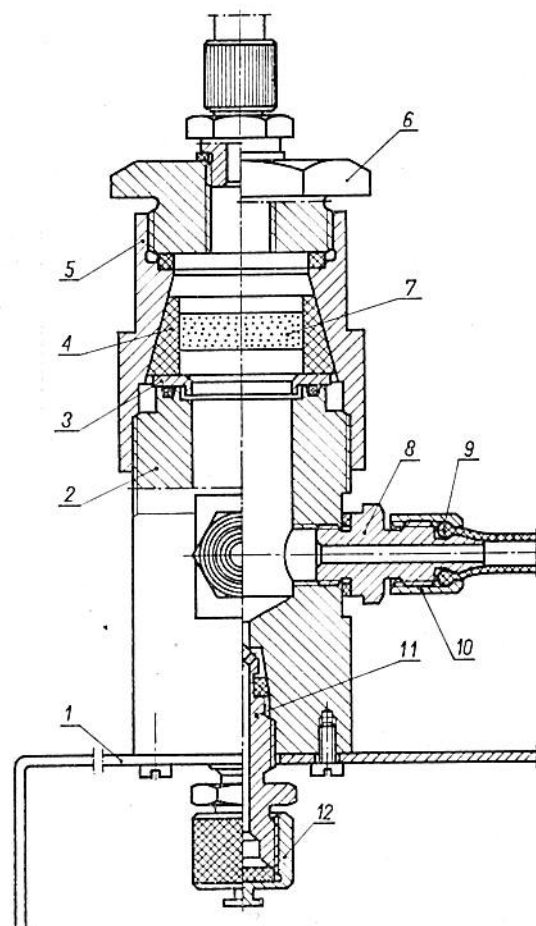
Aparatura laboratoryjna (rys. 5.6) składa się z dwu podstawowych części: zasilającej (przyrządy 2—8) i pomiarowej (przyrządy 9—14). W skład części zasilającej wchodzi urządzenia kon-



Rys. 5.6. Schemat ideowy stoiska pomiarowego wg metody dwóch charakterystyk; 1 — kierunek przepływu powietrza, 2 — filtr wstępny, 3 — manometr, 4 — reduktor, 5 — zbiornik wyrównawczy, 6 — filtr dokładny, 7 — reduktor precyzyjny, 8 — wymiennik ciepła, 9 — zawór odcinający, 10 — przepływomierz, 11 — termometr, 12 — pirometr laboratoryjny, 13 — próbka materiału filtracyjnego, 14 — manometr pomiarowy, 15 — tłumik, 16 — zawór odcinający

dycjonowania powietrza, a mianowicie filtry wstępnego i dokładnego oczyszczania, zawory redukcyjne i nastawcze ciśnienia, zbiornik wyrównawczy oraz wymiennik ciepła. W skład części pomiarowej wchodzi urządzenia pomiaru natężenia przepływu (przepływomierze), ciśnienia (manometry), temperatury oraz pomiaru do zamocowania badanej przegrody filtracyjnej. Przepływomierze i manometry, o różnych zakresach pomiarowych są włączone w taki sposób, aby możliwe było ich przełączenie w czasie trwania pomiaru. Przyjęcie takiego schematu pomiarowego zgodnie z rys. 5.6 jest konieczne ze względu na ciągłość cyklu wyzna-

czania zależności natężenia przepływu gazu przez próbkę nasyconą cieczą testową i odpowiadającego mu spadku ciśnienia. Zmniejszenie natężenia przepływu w czasie trwania pomiaru prowadzi do wtórnego i najczęściej niepełnego nasycenia się próbki cieczą testową znajdującą się w pewnej ilości w porometrze nad badaną próbką, co powoduje błędy w uzyskanych wynikach. Przykład konstrukcji porometru laboratoryjnego przystosowanego do badania próbek nieodkształcalnych jednego rozmiaru przedstawiono na rys. 5.7.



Rys. 5.7. Konstrukcja porometru laboratoryjnego; 1 — korpus, 2 — podstawa, 3 — przekładka dociskowa, 4 — obejma gumowa, 5 — tuleja, 6 — nakrętka pomocnicza, 7 — badana próbka, 8 — końcówka pneumatyczna, 9 — przewód doprowadzający gaz, 10, 12 — nakrętki, 11 — zawór

Charakterystykę odfiltrowania uzyskujemy stosując metodę dwu charakterystyk. Metoda ta polega na wyznaczeniu najpierw $Q_0 = f_1(p)$ i $Q = f_2(p)$, a następnie na ich podstawie — $e_f(x)$.

Wyznaczanie charakterystyki $Q_0 = f_1(p)$ składa się z następujących operacji:

- 1) zmontowanie układu pomiarowego,
- 2) przygotowanie powierzchni próbki (odtłuszczenie patrz rozdz. 8 punkt 8.3),
- 3) szczelne umieszczenie próbki w porometrze,
- 4) pomiar i wykreślenie zależności $Q_0 = f_1(p)$.

Wyznaczanie charakterystyki $Q = f_2(p)$ zawiera następujące operacje:

- 1) zmontowanie układu pomiarowego,
- 2) odtłuszczenie powierzchni próbki,
- 3) nasączenie próbki w cieczy testowej o znacznym napięciu powierzchniowym (przez gotowanie i studzenie lub przy użyciu płuczki ultradźwiękowej),
- 4) szczelne umieszczenie w porometrze,
- 5) wprowadzenie nad powierzchnię próbki cieczy testowej na wysokość 2÷5 mm,
- 6) pomiar i wykreślenie $Q = f_2(p)$.

Wyznaczenie charakterystyki odfiltrowania $e_f(x)$ na podstawie otrzymanych dwu wykresów Q_0 i Q polega na obliczeniu stosunku $(Q_0 - Q)/Q_0$ dla poszczególnych ciśnień p i przetransponowaniu wartości na wykres $e_f(x) = f(x \equiv y \equiv A/p)$. Należy zaznaczyć, że moment pojawienia się pierwszego pęcherzyka gazu nad powierzchnią próbki podczas zwiększania ciśnienia odpowiada wartości $e_f(x) = 1$, a zależność $Q(p) = Q_0(p)$ odpowiada wartości $e_f(x) = 0$ (całkowite usunięcie cieczy testowej z próbki). Wykreślenie charakterystyk przepływowych i charakterystyki odfiltrowania na jednym arkuszu ułatwia czynności obliczeniowe i czyni uzyskane wyniki bardziej pogładowymi.

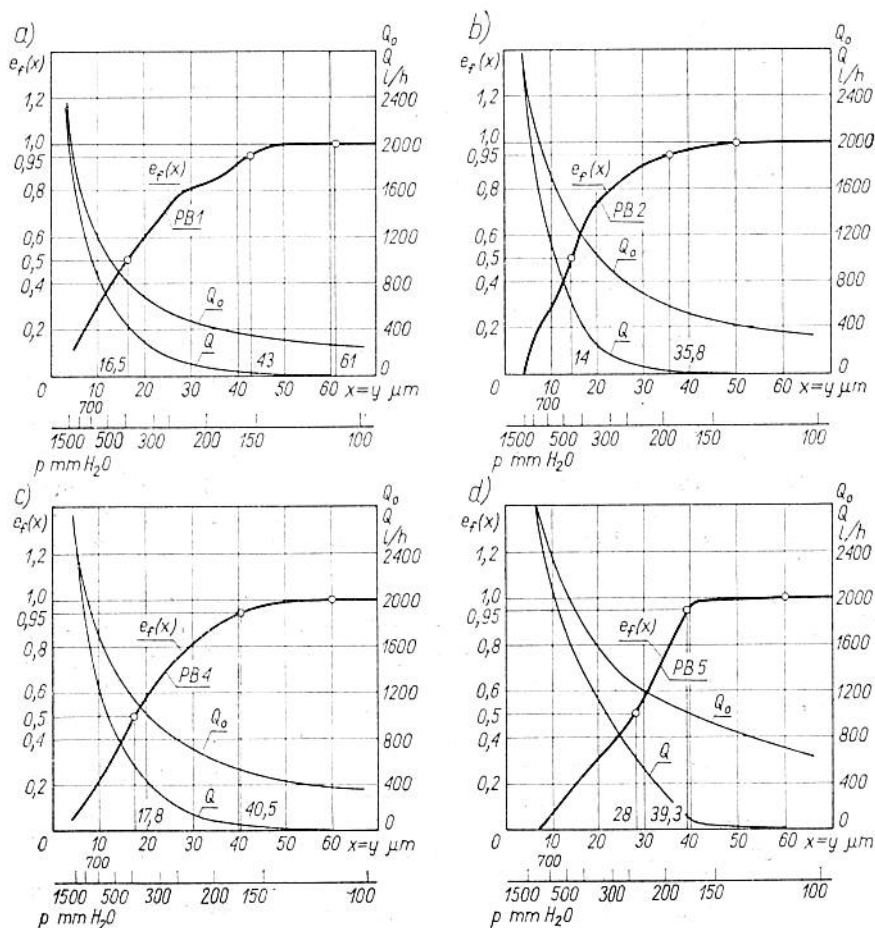
Zastosowanie wzoru $y = A/p$ umożliwiającego przejście z ciśnień charakterystyki $Q = f_2(p)$ na wymiary porów y , wymaga wyjaśnień. Do obliczenia y przyjmuje się najczęściej $A = \text{const}$. Należy pamiętać o tym, że wartość współczynnika napięcia powierzchniowego δ występująca w A zależy od wielu czynników takich, jak: szorstkość powierzchni porów, promienie krzywizny ścianek porów, temperatura, ciśnienie, domieszki gazu i zanieczyszczeń stałych w cieczy testowej itp. Również kąt zwilżania wykazuje pewne zmiany a więc przyjmowanie wartości $\Theta = 0^\circ$ jest pewnym uproszczeniem. Liczbowe ujęcie wpływu czynników ubocznych na wartość A , a przez to na wyniki badań, wydaje się być trudne i może prowadzić do zbyt skomplikowanych zależności.

Należy zdawać sobie sprawę z tego, że proponowana metoda

dwu charakterystyk ma przede wszystkim taką zaletę, jak możliwość porównywalna wyznaczonych charakterystyk odfiltrowania, przy czym liczbowe wyniki tej metody powinny być sprawdzone przez zastosowanie innej metody badania.

5.2.4. Przykładowe wyniki badań

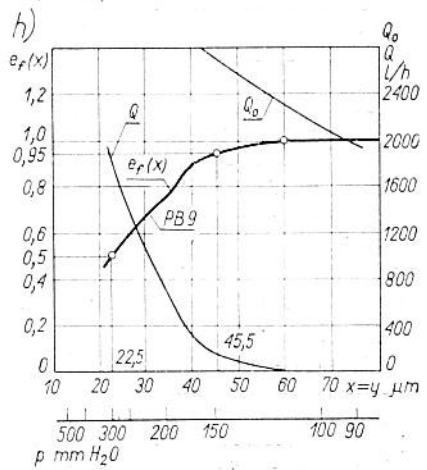
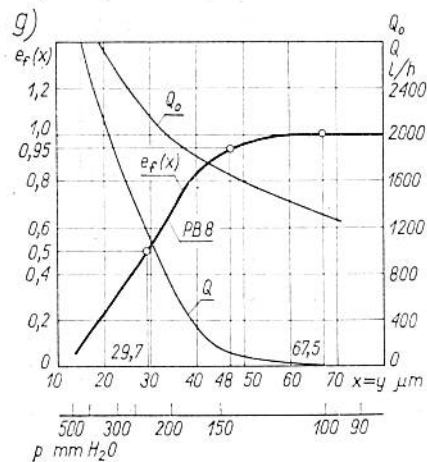
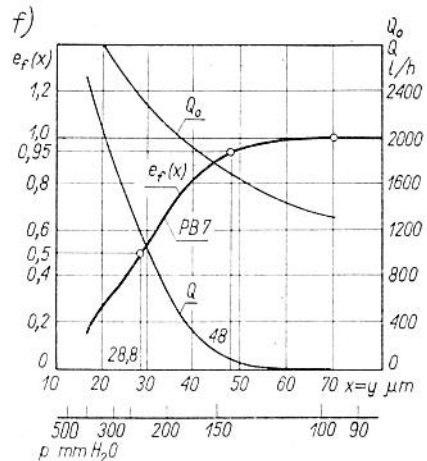
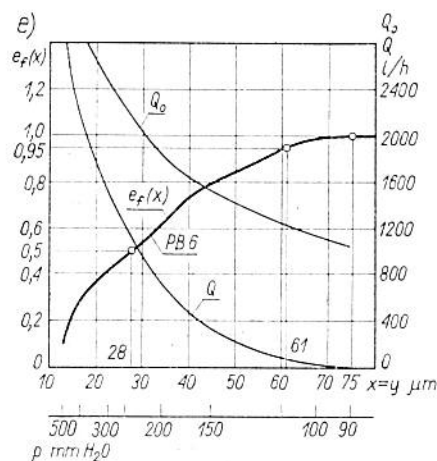
Do badań użyto próbek metalowych filtrów spiekanych wykonanych w kształcie walca o średnicy D i wysokości h , określającej grubość przegrody filtracyjnej. Ziarna, z których wykonano filtry



Rys. 5.8. Przykładowe przebiegi charakterystyk odfiltrowania

miały kształty kul o średnicach w zakresie od d_1 do d_2 mm, przy czym ok. 5% ziarn miało wymiary znajdujące się poza tym zakresem.

Przed przystąpieniem do badań charakterystyk odfiltrowania wykonano pomiary parametrów geometrycznych próbek (średnica, wysokość, porowatość). Badania charakterystyk odfiltrowania przeprowadzono dokonując pomiaru przepływu powietrza przez próbkę „suchą” filtru w celu określenia zależności $Q_0(p)$ i przez próbkę nasyconą wodą $Q(p)$. Wartość $y = x$ obliczono na podstawie wzoru $y = A/p$.



uzyskane metodą dwóch charakterystyk

Współczynnik A przyjęto jako wartość stałą i określono w następujący sposób. Ze wzoru Barusa-Bechholda wartość $A = 2\delta \cos \Theta$ jest słuszna dla kapilary o przekroju kołowym. W celu uzyskania wyników zbliżonych do rzeczywistych, we wzorze określającym $y = A/p$ uwzględniono nieregularny kształt przekroju poru przez wprowadzenie współczynnika korekcyjnego k . Współczynnik k obliczono przy założeniu, że największy przekrój poru jest utworzony przez zetknięcie się trzech kul o jednakowych promieniach r_k . Obwód takiego poru wynosi πr_k i przez zastąpienie powierzchni przekroju tego poru powierzchnią koła, otrzymamy zastępczy promień $y_1 = 0,5 r_k$. Powierzchnia przekroju poru wynosi $(\sqrt{3} - \pi/2)r_k^2$ i stąd otrzymamy zastępczy promień $y_2 = 0,226 r_k$. Obliczając $k = y_2/y_1 = 0,452$, otrzymamy $A = 2k\delta \cos \Theta = 0,904 \delta \cos \Theta$, a po uwzględnieniu założenia o pełnym zwilżaniu poru ($\Theta = 0$) i $\delta = 72,6$ dyn/cm (woda destylowana) $A = 0,67$,

Tablica 5.1. Przykładowy zestaw wyników pomiarów próbek metalowych filtrów spiekanych CuSn10 (średnica kulek 0,2÷0,3 mm)

Dane wyjściowe próbek	Symbol próbki filtru							
	PB1	PB2	PB4	PB5	PB6	PB7	PB8	PB9
Średnica D mm	20,3	20,5	20,3	20,4	20,4	20,2	20,4	20,5
Grubość h mm	8,97	7,57	4,82	2,47	2,07	1,42	1,13	1,02
Masa m g	16,9	14,0	9,31	4,72	3,51	2,33	2,07	1,68
Objętość cm^3	2,91	2,50	1,56	0,81	0,78	0,46	0,37	0,34
Gęstość g/cm^3	5,82	5,60	5,95	5,85	5,18	5,11	5,62	5,00
Porowatość u %	33,7	36,2	32,2	33,4	41,0	41,8	36,0	43,0
Powierzchnia F cm^2	3,24	3,30	3,24	3,27	3,27	3,21	3,27	3,30
Pow. przepł. F' cm^2	1,09	1,19	1,05	1,09	1,34	1,34	1,78	1,42
Wartość x μm z pomiarów charakterystyki odfiltrowania $e_f(x)$								
Dla $e_f(x) = 1,00$	61,0	50,0	60,0	60,0	75,0	70,0	67,5	60,0
Dla $e_f(x) = 0,95$	43,0	35,8	40,5	39,3	61,0	48,0	48,0	45,5
Dla $e_f(x) = 0,50$	16,5	14,0	17,8	28,0	28,0	28,8	29,7	22,5

czyli wymiar poru otwieranego przy ciśnieniu p (mm H₂O) można określić zależnością

$$y = 6700/p \text{ } \mu\text{m} \quad (5.17)$$

Należy zaznaczyć, że wprowadzenie współczynnika korekcyjnego k do wzoru Barusa-Bechholda w postaci stosunku zastępczych wymiarów promieni otrzymanych przez obliczenie powierzchni przekroju, na które działa ciśnienie p , i obwodu zwilżonego cieczą testową jest uproszczeniem. Niemniej jednak charakterystyki odfiltrowania uzyskane przy zastosowaniu opisanej tutaj metody, jak i metody liczenia ilości i rozkładu cząstek przed i za filtrem, niebýt różnią się między sobą.

Na rys. 5.8a-h przedstawiono wykresy charakterystyk odfiltrowania próbek metalowych filtrów spiekanych różnej grubości, otrzymanych z proszków kulistych o jednakowym składzie wymiarowym. W tabl. 5.1. podano zestawienie danych wyjściowych i wyznaczone wartości x dla typowych punktów charakterystyki odfiltrowania — dokładność absolutną dla $e_f(x) = 1,00$ i dokładność nominalną dla $e_f(x) = 0,95$ i $e_f(x) = 0,50$. Wykresy charakterystyk odfiltrowania różnią się między sobą, a ich przebiegi umożliwiają analizowanie „rozzutu technologicznego” efektywności filtrowania oraz wpływu parametrów geometrycznych na własności filtracyjne filtrów.

5.2.5. Uwagi i wnioski

1) Wnioski dotyczące zjawisk występujących przy zd e j m o w a n i u c h a r a k t e r y s t y k i p r z e p ł y w o w e j.

a) Pojawienie się pierwszego pęcherzyka powietrza nad próbką jest zależne od ciśnienia powietrza pod próbką, napięcia powierzchniowego cieczy wypełniającej por i wymiarów poru. Charakter zjawiska można wówczas określić jako statyczny. Z chwilą pojawienia się przepływu powietrza przez por charakter zjawiska zmienia się na dynamiczny. Powstają efekty uboczne jak zmiany przepływu, ciśnienia, powstawanie i zrywanie błonek „resztkowych”, parowanie cieczy, porywanie cieczy z bocznych kanałów, rozbijanie kropeł cieczy, powstawanie „kaskad międzyporowych”, zmiany prężności pary itp.

Efekty te powodują „przedwczesne” otwarcie porów mniejszych od normalnie otwierających się przy danym ciśnieniu. Jeżeli po otwarciu się nadmiernej ilości porów nie będzie nad próbką warstwy cieczy, pory „przedwcześnie” otwarte nie będą mogły być ponownie zalane cieczą (przynajmniej częściowo). Ewentualny spadek ciśnienia nie pociągnie za sobą zamknięcia się porów a więc

odczyt przepływu będzie zbyt duży. Obecność cieczy nad próbką nie zapewnia całkowitego zniwelowania działania czynników ubocznych (często przypadkowych), gdyż charakterystyka $Q = f(p)$ ma histerezę spowodowaną innymi kątami zwilżania przy napływie i odpływie cieczy, ale z pewnością w znacznym stopniu kompensuje wpływ zjawisk dynamicznych przy przepływie powietrza przez pory.

b) Na wynik pomiarów charakterystyki przepływowej $Q = f(p)$ ma niewielki wpływ szybkość wzrostu ciśnienia pod warunkiem występowania cieczy nad próbką. W niektórych przypadkach występowanie cieczy nad próbką niweluje zupełnie histerezę. Na ogół uzyskuje się całkowitą powtarzalność charakterystyki przy wielokrotnej zmianie ciśnienia zarówno w zakresie od około 1 mm H₂O na sekundę do 10 mm H₂O na sekundę. Szybka zmiana ciśnienia wymaga odczekania pewnego czasu niezbędnego do ustabilizowania się charakterystyki.

2) Uwagi dotyczące konstrukcji porometru laboratoryjnego

a) Badanie ułatwia zastosowanie siatki na wlocie powietrza do porometru pod próbką i otworem do manometru. Zmniejszy to nierównomierność strumienia powietrza.

b) Zwiększenie przekroju porometru nad próbką umożliwia zwiększenie ilości cieczy bez powiększenia słupa cieczy, a więc bez zmiany ciśnienia nad próbką. Zabezpiecza to przed wyrzucaniem kropelek cieczy poza porometr przez strumień powietrza przepływającego przez próbkę, czyli zapewnia występowanie niezbędnego słupa cieczy nad próbką.

3) Uwagi dotyczące schematu układu pomiarowego

W czasie zdejmowania charakterystyki przepływowej $Q = f(p)$, przy nagłym otwarciu dużej ilości porów występuje zjawisko gwałtownego wzrostu natężenia przepływu, a jednocześnie spadku ciśnienia. Ze względu na dokładność metody pomiarowej spadek ciśnienia jest zjawiskiem wybitnie niekorzystnym z powodu występowania zjawisk histerezy. Uzyskiwanie ciśnienia za pomocą regulacji ręcznej jest dość uciążliwe. Korzystnym wydaje się użycie układu z regulatorem PI, którego wejściem (wartością zadaną) byłoby żądane ciśnienie, a wartością mierzoną rzeczywiste ciśnienie w przestrzeni porometru pod próbką.

4) Uwagi dotyczące przyrządów układu pomiarowego

W czasie wykonywania pomiarów laboratoryjnych dość dużą trudnością jest niemożność uzyskania z typowego zadajnika, zero-

wego przepływu oraz powolnego i płynnego zwiększania ciśnienia od wartości zerowej.

5) Uwagi i wnioski dotyczące wyników badań

a) Badając próbkę nasączoną wodą destylowaną, a następnie alkoholem metylowym, otrzymuje się znaczne rozbieżności liczbowe wyników, przy zachowaniu ogólnego charakteru przebiegu zjawisk. Rozbieżność ta zdaje się potwierdzać wniosek o zmianie napięcia powierzchniowego cieczy nasączającej próbkę.

b) Wpływu grubości próbki, jej porowatości i wymiarów kulek, z których próbka się składa, na przepuszczalność danej próbki nie można jednoznacznie określić, gdyż w badaniach nie uzyskuje się tych zależności w czystej postaci. Jednak z przykładowych wyników można zauważyć, że zwiększenie porowatości w znacznie większym stopniu wpływa na wzrost przepuszczalności niż identyczne procentowo zmniejszenia grubości próbki. Na podstawie danych uzyskanych z literatury wynika, że trzykrotne zmniejszenie grubości ma ten sam wpływ co 10% zwiększenie porowatości.

c) Analizując charakterystyki odfiltrowania należy zwrócić uwagę na to, iż różnią się one nawet w przypadku filtrów o zbliżonych grubościach, porowatościach i wymiarach kulek tworzących filtr. Na charakterystykę odfiltrowania wpływa wiele czynników, często zupełnie przypadkowych, tak że nawet niezmiennosc procesu produkcyjnego i surowców wyjściowych nie zapewnia stałości i określonych właściwości filtracyjnych. Stąd wniosek, że w przypadku zastosowania w urządzeniach filtrów o ściśle określonych właściwościach filtracyjnych należy każdorazowo przebadać te filtry.

6) Wnioski ogólne

a) podstawowa metoda pomiarowa opierając się na wprowadzonych zależnościach teoretycznych umożliwia analityczno-doswiadczalne wyznaczenie charakterystyki odfiltrowania.

b) Badania laboratoryjne charakterystyki odfiltrowania polegają na pomiarze natężenia przepływu płynu i odpowiadającego mu spadku ciśnienia na przegrodzie filtracyjnej bez konieczności liczenia ilości i rozkładu zanieczyszczeń w cieczy filtrowanej przed i za przegrodą.

c) Badania charakterystyki odfiltrowania są możliwe przy użyciu proszku testowego o znanych zakresach wymiarowych, wprowadzonego do dowolnej cieczy, przez pomiar natężeń przepływu cieczy i odpowiadającego temu przepływowi spadku ciśnienia na przegrodzie filtracyjnej.

d) Badania charakterystyki odfiltrowania są możliwe przy użyciu cieczy testowej o znanym napięciu powierzchniowym przez dwukrotny pomiar natężenia przepływu gazu i odpowiadającego

mu spadku ciśnienia przez „suchą” przegrodę filtracyjną i nasyconą cieczą testową.

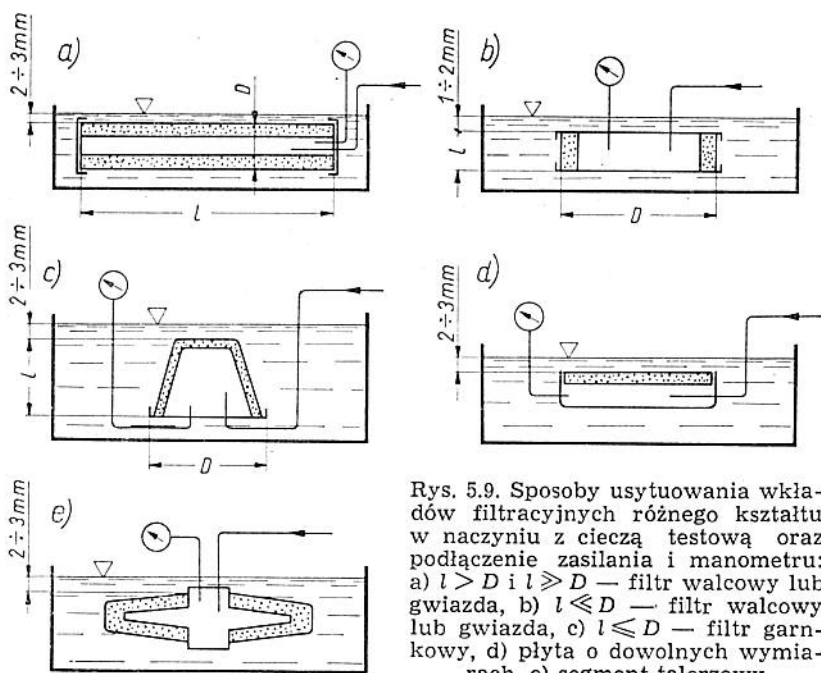
e) Doświadczalno-analityczne metody wyznaczania charakterystyk odfiltrowania w całym zakresie ich przebiegu cechuje wysoka dokładność i duża szybkość uzyskiwania wyniku przy użyciu prostej i typowej aparatury laboratoryjnej.

f) Metoda doświadczalno-analityczna wyznaczania charakterystyki odfiltrowania, polegająca na pomiarze natężenia przepływu gazu i odpowiadającego mu spadku ciśnienia, może być przeznaczona do bieżącej kontroli produkcyjnej filtrów i materiałów filtracyjnych oraz szybkich ocen arbitrażowych ze względu na zastosowanie badań nieniszczących.

g) Można w prosty sposób dokonać automatyzacji czynności wyznaczania charakterystyki odfiltrowania, gdyż mierzy się jedynie natężenie przepływu i ciśnienie, tj. parametry, dla których istnieją produkcyjne przetworniki stosowane w układach automatycznej regulacji.

7) Uwagi końcowe

W celu przeprowadzenia badań próbek o różnych kształtach oraz kompletnych wkładów filtracyjnych, zaleca się uwzględnienie



Rys. 5.9. Sposoby usytuowania wkładów filtracyjnych różnego kształtu w naczyniu z cieczą testową oraz podłączenie zasilania i manometru: a) $l > D$ i $l \geq D$ — filtr walcowy lub gwiazda, b) $l \ll D$ — filtr walcowy lub gwiazda, c) $l \leq D$ — filtr garnkowy, d) płyta o dowolnych wymiarach, e) segment talerzowy

następujących uwag dotyczących konstrukcji komór do zamocowania badanych filtrów.

a) Kompletne wkłady lub segmenty filtrów oraz badane wycinki materiałów filtracyjnych powinny być umocowane tak szczerlnie, aby nie zachodziła obawa, że pomiar natężenia przepływu gazu przez próbkę „suchą” i próbkę nasyconą cieczą testową może być wykonany z błędem wynikającym z „bocznikującego” przepływu przez nieszczelności.

b) Konstrukcja komory powinna być taka aby po nasyceniu wkładu cieczą testową następowało wyciskanie tejże cieczy przy zamocowywaniu, jak i w wyniku samego zamocowania.

c) Konstrukcja komory powinna zapewniać zachowanie czystości cieczy testowej oraz bezpieczeństwo dla obsługi.

d) Usytuowania badanego wkładu filtracyjnego w naczyniu z cieczą testową powinno być takie, aby płaszczyzna lustra cieczy testowej znajdowała się możliwie najbliżej wszystkich części badanego wkładu. Im różnice w odległościach od lustra cieczy testowej poszczególnych części badanego wkładu będą mniejsze, popełniany błąd wynikający z różnego ciśnienia hydrostatycznego działającego na element będzie możliwy do pominięcia.

Sposób usytuowania badanego wkładu filtracyjnego jest szczególnie ważny w przypadku wkładów filtracyjnych z dużymi porami, gdyż ciśnienie pierwszego „pęcherzyka gazu” jest małe. W przypadku wkładów filtracyjnych dokładnego i bardzo dokładnego oczyszczania można dopuścić większą swobodę w sposobie ich usytuowania w naczyniu z cieczą testową. Zalecane usytuowania typowych wkładów filtracyjnych pokazano schematycznie na rys. 5.9.

5.3. Proste metody laboratoryjne badań filtrów

5.3.1. Uwagi ogólne

Większość laboratoryjnych metod badań filtrów sprowadza się do pomiarów statystycznych liczby i wymiarów cząstek zanieczyszczeń naturalnych lub testowych przed i po przejściu przez filtr. Mając stopień koncentracji zanieczyszczeń w tych dwu miejscach pomiarowych określamy wskaźniki efektywności filtrowania.

Do najprostszych metod oceny można zaliczyć *obserwacje i porównanie okien nieuzbrojonych osadu próbek oleju* niefiltrowanego i oczyszczonego. Są one jednak tak niedokładne, że dla wymagań współczesnych urządzeń nie mają praktycznego zastosowa-

nia. To też stosowane są różnorodne *metody z wykorzystaniem mikroskopu*. Już powiększenie 100 do 600 razy umożliwia dokładną obserwację zanieczyszczeń. Głównie są stosowane dwie metody badań z mikroskopem. Pierwsza polega na *liczeniu cząstek zawieszonych w objętości cieczy lub gazu*, a druga — na *badaniu osadu*. W obu metodach są najczęściej stosowane przystawki fotograficzne umożliwiające wykonywanie zdjęć zanieczyszczeń.

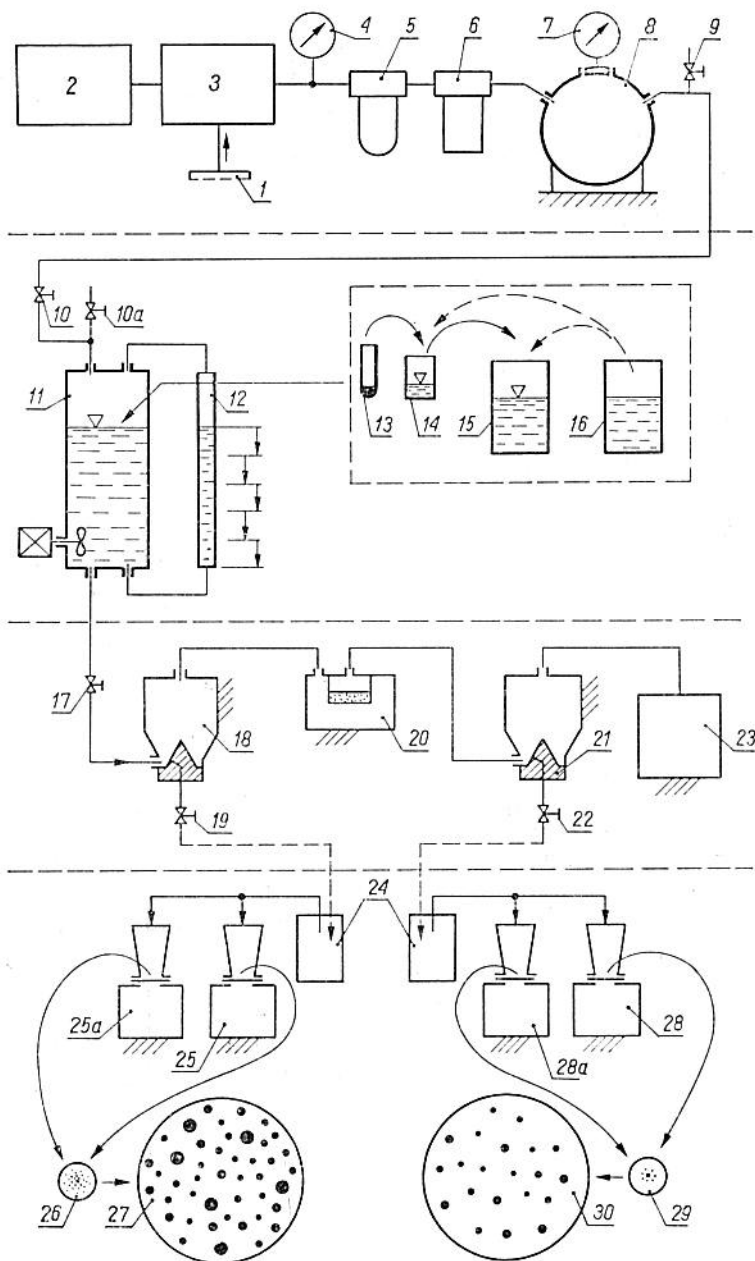
W celu zbadania określonego urządzenia filtracyjnego najczęściej przygotowuje się odpowiednią ilość proszku testowego i dokładnie miesza z przepuszczanym czynnikiem, stanowiącym monolityczną fazę podstawową, zaś cząstki testowe stanowią dyspersyjną fazę stałą (symulującą zanieczyszczenia stałe). Tak przygotowany czynnik jest przepuszczany w określonej objętości przez badane urządzenie lub materiał filtracyjny. W odpowiednim czasie pobiera się próbki przed i po przejściu przez filtr, a następnie po rozcieńczeniu lub zagęszczeniu wprowadza się do przyrządów pomiarowych, w których jest możliwe określenie przy użyciu mikroskopu liczby i wielkości cząstek testowych. Podobne postępowanie jest możliwe z płynami zawierającymi zanieczyszczenia naturalne.

5.3.2. Opis stoisk pomiarowych

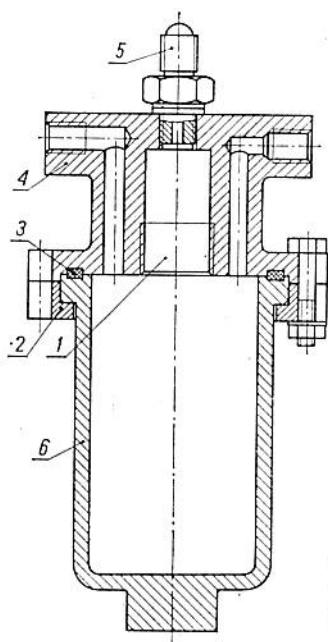
Przedstawiony na rys. 5.10 schemat określa dokładniej zastosowaną metodę pomiarową. Opis zespołów stoiska umożliwia wyjaśnienie metody pomiarów.

Elementy 1 do 9 stanowią zespół pomocniczy zasilania ciśnieniem zespołu wejściowego. Powietrze zassane przez filtr 1 jest tłoczone przez sprężarkę 3 napędzaną silnikiem 2 do zbiornika 8. Manometry 4 i 7 wskazują ciśnienie zasilania i ciśnienie po przejściu przez filtr 5 i osuszacz 6 w zbiorniku 8 stanowiącym akumulator pneumatyczny. Zawór 9 służy do dokładnego ustalenia ciśnienia w akumulatorze.

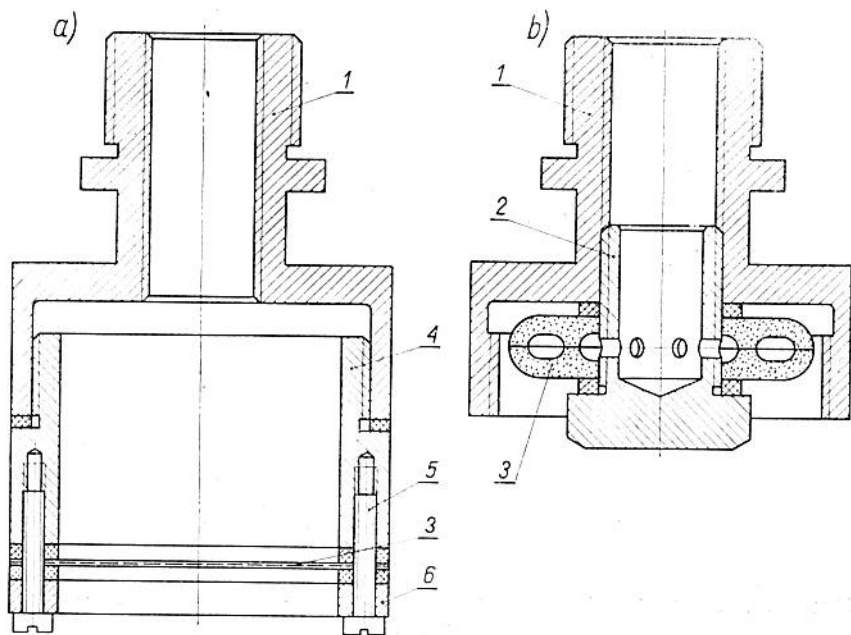
Zespół wejściowy składa się z elementów 10 do 15. Zawór odcinający 10 łącznie z zaworem upustowym 10a znajdują się na wejściu do zbiornika. Zbiornik 11 jest wyposażony w mieszadło oraz we wskaźnik poziomu cieczy 12 zawierający ciecz z zanieczyszczeniami. Zbiornik 11 przed rozpoczęciem badań służy do dokładnego wymieszania proszku testowego z cieczą. Wprowadzenie zanieczyszczeń odbywa się przez wstępne zmieszanie dokładnie odważonej ilości proszku 13 z małą ilością cieczy ze zbiornika 14, a następnie przez zwiększenie rozcieńczenia. Ciecz w zbiorniku 16 służy do wymycia zbiorników przygotowawczych 14 i 15 i jest również wprowadzana do zbiornika 11.



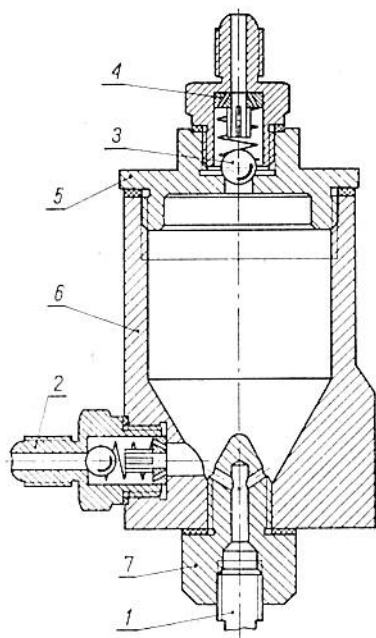
Rys. 5.10. Schemat układu pomiarowego do badań filtrów niskociśnieniowych



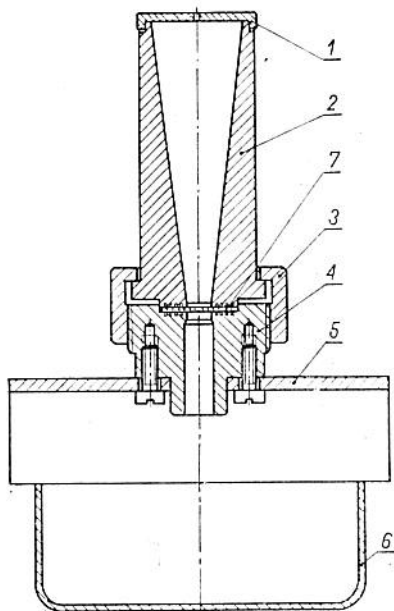
Rys. 5.11. Uniwersalna komora do badania filtrów; 1 — gniazdo do zamocowania opravek filtrów, 2 — pierścień, 3 — uszczelnienie główne komory, 4 — korpus, 5 — końcówka złącza, 6 — obudowa



Rys. 5.12. Przykłady konstrukcyjne opravek materiałów filtracyjnych; 1 — końcówka, 2 — korek do zamocowania filtra talerzowego, 3 — badane materiały filtracyjne, 4 — oprawka badanej siatki, 5 — wkręty mocujące, 6 — pierścień dociskowy



Rys. 5.13. Komora zawirowań; 1 — łącznik zaworu probierczego, 2 — łącznik wlotu cieczy, 3 — kulka zaworu zwrotnego, 4 — zderzak, 5 — pokrywa, 6 — korpus, 7 — stożek

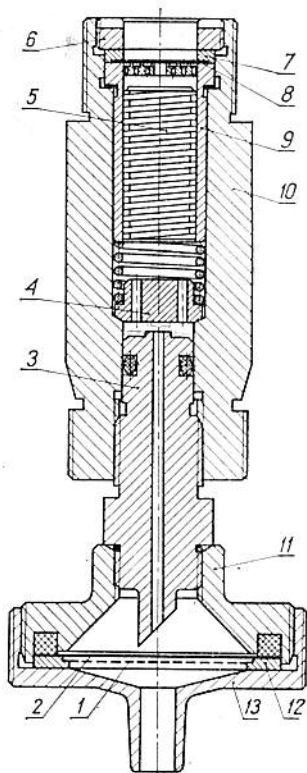


Rys. 5.14. Komora osadczą; 1 — pokrywa, 2 — lejek, 3 — nakrętka, 4 — obsada filtra, 5 — podstawa, 6 — naczynie spływowe, 7 — przepona filtracyjna

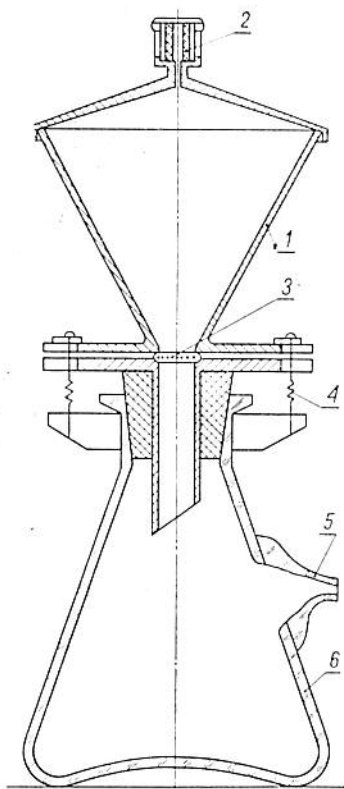
Elementy 17 do 23 stanowią właściwy zespół (układ) pomiarowy. Zawór 17 dawkuje odpowiednią objętość cieczy do komory zawirowań 18 z zaworem probierczym 19, poprzez komorę badawczą 20 i analogiczną komorę zawirowań 21 do zbiornika przelewowego 23.

W pomocniczym zespole (układzie) pomiarowym 24 do 30 znajdują się przyrządy pomiarowe 25, 25a, 28, 28a, w które wlewa się rozcieńczone w zbiornikach 24 próbki cieczy. W komorach tych znajdują się przegrody z bibuły mikronowej 26 i 29, na których osadzają się cząstki zanieczyszczeń testowych, a następnie są one zliczane przy odpowiednim powiększeniu 27 i 28 pod mikroskopem. Schematy konstrukcyjne niektórych przyrządów stoiska pomiarowego przedstawiono na rys. 5.11 do 5.16.

Układ pomiarowy z rys. 5.10 umożliwi pomiary filtrów przy stosunkowo niskim ciśnieniu filtrowania ze względu na zastosowanie sprężonego powietrza. Wyższe ciśnienia mogą być stosowane



Rys. 5.15. Przykład konstrukcji nowoczesnego zaworu probierczego; 1 — filtr przeponowy, 2 — ruszt, 3 — końcówka, 4 — płyta blokady przepływu, 5 — labiryntowy opór dławiący, 6, 7 — pierścienie dociskowe, 8 — siatka zgrubna, 9 — tuleja, 10 — korpus, 11 — oprawa filtru przeponowego, 12 — kołek, 13 — nakrętka



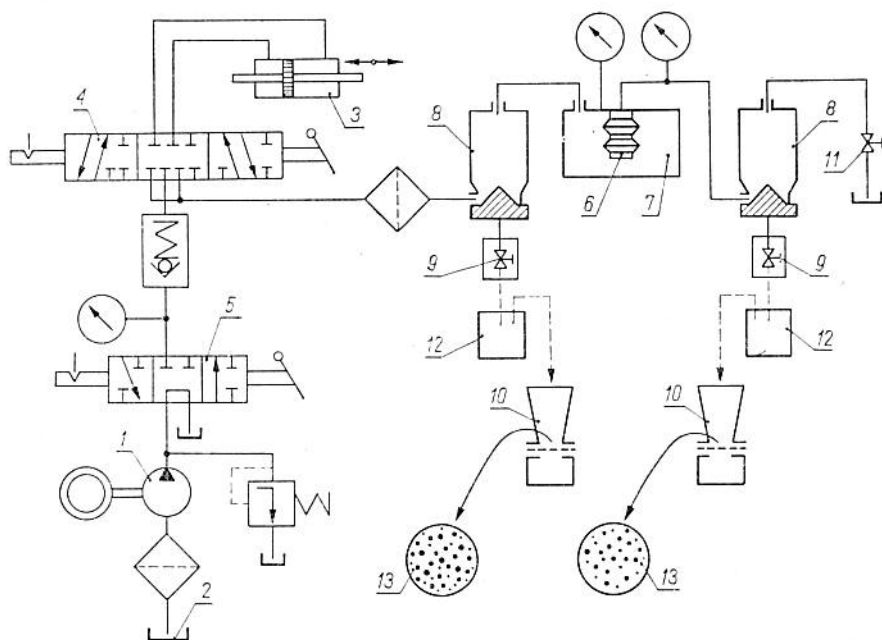
Rys. 5.16. Urządzenie do uzyskiwania osadu na przeponie filtracyjnej; 1 — lejek na próbki cieczy, 2 — filtr powietrza, 3 — przepona filtracyjna, 4 — sprężyny złącza przyrządu, 5 — złącze do iniektora, 6 — kolba o objętości 1 l

wane przy wykorzystaniu np. gazów obojętnych (azot). W celu prowadzenia badań filtrów cieczy w zakresie wysokich ciśnień należy korzystać z układu pomiarowego przedstawionego na rys. 5.17.

Układ pomiarowy pokazany na rys. 5.17 jest zmontowany na uniwersalnym stoisku hydraulicznym wyposażonym w pompę 1, zbiornik 2 z regulowaną temperaturą czynnika roboczego oraz oprzyrządowanie standardowe spotykane w hydraulicznych jed-

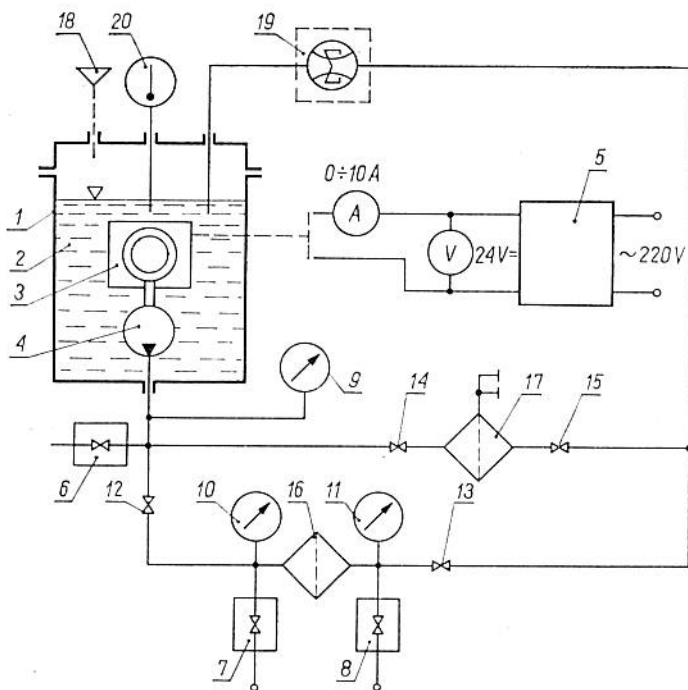
nostkach zasilających. Wybrano taki schemat układu pomiarowego, który zabezpiecza możliwość zasilania czynnikiem zanieczyszczonym w wyizolowanej części układu przez oddzielenie go od zasilania tłokiem siłownika 3. Przedstawiony schemat połączeń zrealizowany w układzie rewersyjnym za pomocą rozdzielaczy 4 i 5 umożliwia zasilanie stałą objętością badanego elementu filtrującego 6 olejem zanieczyszczonym proszkiem testowym. W układzie pomiarowym można stosować oprócz elementów typowych produkowanych seryjnie, część oprzyrządowania specjalnego projektowanego i wykonanego do badań określonych typów wkładów filtracyjnych (np. komora filtru 7). Można również zastosować dodatkowe elementy (komora zawirowań 8, zawory probiercze 9, odstożniki 10 itp.) używane do badań efektywności filtrowania i określania zanieczyszczeń w czynniku roboczym w innych układach pomiarowych.

W celu określenia charakterystyki odfiltrowania metodą testową jest niezbędne obliczanie ilości zanieczyszczeń o danych wymiarach w cieczy filtrowanej przed i za elementem filtrującym. Układ pomiarowy przedstawiony schematycznie na rys. 5.17 zapewnia jednoznaczność wyników dla wielu pobieranych próbek.



Rys. 5.17. Schemat układu pomiarowego do badań filtrów wysokociśnieniowych

Działanie układu jest następujące. Po wycofaniu siłownika 3 w jedno ze skrajnych położeń przez odpowiednie ustawienie rozdzielacza 4 i 5 zalewamy komorę zawirowań 8 olejem i wprowadzamy do niej odpowiednią ilość zanieczyszczeń; ilość tę określamy mnożąc objętość użyteczną siłownika, objętość komory zawirowań 8 i komory ciśnieniowej 7 przez określoną na wstępie wartość np. 0,2 g/l. Komorę ciśnieniową 7 i drugą komorę zawirowań przemywamy i zalewamy olejem bez zanieczyszczeń testowych. Po wykonaniu powyższych czynności przełączamy zawór w drugie skrajne położenie, powodując ruch siłownika i przetłaczanie oleju przez elementy 1, 2 i 3 układu. Należy zaznaczyć, że ciśnienie zasilania i otwarcie zaworu 11 są tak dobrane, by ciśnienie oleju w komorze 7 odpowiadało nominalnemu ciśnieniu filtrowania. W chwili, gdy siłownik przechodzi przez położenie środkowe otwieramy za-



Rys. 5.18. Schemat uniwersalnego układu pomiarowego do badania efektywności filtrów; 1 — zbiornik cieczy zamykany hermetycznie, 2 — ciecz, 3 — silnik napędowy prądu stałego, 4 — pompa zasilająca, 5 — zasilacz regulowany, 6 — zawór probierczy kontrolny, 7, 8 — zawory odcinające pomiarowe, 9, 10, 11 — manometry, 12, 13, 14, 15 — zawory odcinające, 16 — badany filtr, 17 — filtr ultradłokładny, 18 — dozownik zanieczyszczeń, 19 — przepływomierz, 20 — termometr

wory probiercze 9 i pobieramy do menzurek 12 próbki oleju o odpowiedniej objętości (np. 25 ml). Próbki te rozcieńczamy dolewając do nich pewną ilość (np. po 25 ml) rozpuszczalnika i zalewamy do odstojników 10. W odstojnikach czynnik badany przesącza się przez mikronowe bibuły filtracyjne 13 o nominalnej dokładności oczyszczania znacznie mniejszej niż badane filtry. Po przesączeniu oleju przygotowujemy próbki zanieczyszczeń do pomiarów mikroskopowych. Metoda postępowania w tym przypadku może być następująca. Zdejmujemy losowo z bibuły część zanieczyszczeń i przenosimy je na szkiełko mikroskopowe (np. Bürker, Fein-Optik, Jena), rozprowadzając możliwie równomiernie na powierzchni z naciętą siatką pomiarową. Można też przeprowadzać analizę ilości i wymiarów cząstek bezpośrednio na próbkach bibułowych z zanieczyszczeniami pozostałymi w wyniku przesączenia określonej (25 ml) objętości oleju zanieczyszczonego proszkiem testowym.

Schemat uniwersalnego układu pomiarowego do badania efektywności filtrowania przedstawiono na rys. 5.18. Układ pomiarowy jest przystosowany do badań filtrów porowatych i energetycznych w ten sposób, że jest możliwe okresowe oczyszczanie cieczy przy użyciu filtru mikronowego. Do pobierania próbek stosuje się zawory probiercze o konstrukcji zabezpieczającej przed skażeniem wyników. Zastosowanie w układzie przepływomierza sumującego 19 umożliwia badanie również zmian własności filtru w czasie, określanie czasu filtrowania i innych parametrów filtrów (np. charakterystyk przepływowych). Ze względu na wyposażenie układu w pompę zasilającą wirnikową 4 jest możliwe ciągłe i skuteczne mieszanie cieczy. Regulacja ciśnienia na wejściu umożliwia realizację badań przy stałym ciśnieniu zasilania lub zmiennym ciśnieniu dobieranym wg dowolnych kryteriów. Zastosowanie cyrkulacji cieczy w układzie zamkniętym upodabnia stoisko pomiarowe do naturalnych warunków w jakich pracują filtry cieczy.

5.3.3. Dobór koncentracji zanieczyszczeń i metody liczenia

Ze względu na częsty brak informacji o stopniu zanieczyszczenia rzeczywistych układów płynowych, należy przeprowadzić wstępne rozważania nad jakościowym określeniem problemu. Najbardziej istotne jest zagadnienie doboru koncentracji zanieczyszczeń do badań laboratoryjnych. Ze względu na modelowy charakter badań koncentracja powinna odpowiadać warunkom rzeczywistej pracy, natomiast ze względów pomiarowych niejednokrotnie należy wprowadzić zawyżoną koncentrację zanieczyszczeń testowych.

**Tablica 5.2. Norma czystości cieczy
(zalecana do stosowania w USA przez Aerospace)**

Zakres wymiarów cząstek μm	Największa liczba cząstek w 0,1 l cieczy						
	00	0	1	2	3	4	5
5 do 15	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Powyżej 5	152	304	609	1217	2432	4864	9731
15 do 25	22	44	89	178	356	712	1425
Powyżej 15	27	54	109	217	432	864	1731
25 do 50	4	8	16	32	63	126	253
Powyżej 25	5	10	20	39	76	152	306
50 do 100	1	2	3	6	11	22	45
Powyżej 50	1	2	4	7	13	26	53
Powyżej 100	0	0	1	1	2	4	8

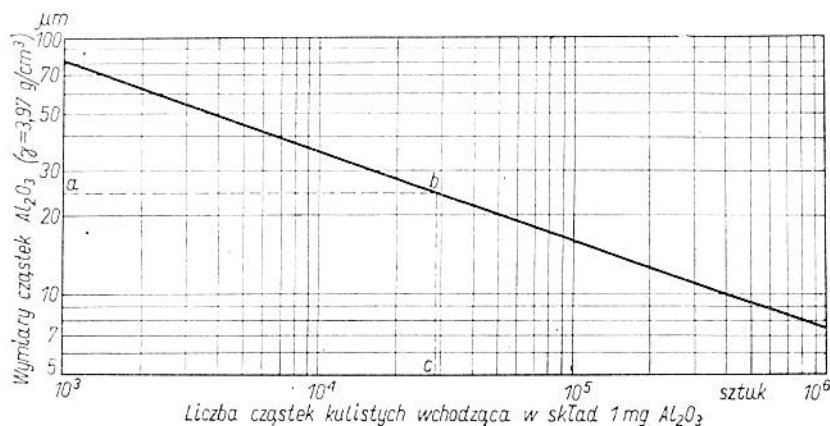
Można przyjąć, że zanieczyszczenia testowe będą wprowadzone do cieczy czystej w ilości odpowiadającej wymaganiom stawianym układom hydraulicznym średnio odpowiedzialnym. W tym przypadku można posłużyć się normą NAS 1638 (USA) i przyjąć, że koncentrację i rozkład wymiarowy zanieczyszczeń testowych należy wybierać tak, aby przybliżyć się do zakresu odpowiadającego 7÷10 klasie czystości cieczy (patrz tabl. 5.2).

W celu określenia przybliżonej liczby dla określonego składu chemicznego, np. dla tlenku aluminium, wygodnie jest posłużyć się sporządzonym specjalnie do tego celu wykresem, ujmującym zależność masy 1 g próbki od liczby zanieczyszczeń określonego wymiaru (rys. 5.19).

W przypadku niewielkiej liczby badań jest celowe posługiwanie się metodą liczenia cząstek przy użyciu mikroskopu optycznego i płytek z naniesioną podziałką z wykorzystaniem fotografii próbek cieczy. Metoda przy użyciu mikroskopu optycznego i wykorzystaniu np. płytek Bürkera może być stosowana do wyznaczania koncentracji zanieczyszczeń o wymiarach cząstek od ok. 5 do 100 μm w zakresie od 5 do 200 sztuk cząstek w objętości 0,1 mm^3 . Dla średnio zanieczyszczonych cieczy roboczych (klasa 7÷9 wg

**National Aerospace Standard 1638
Industries of America Incorporated)**

określająca klasę czystości cieczy						
6	7	8	9	10	11	12
16000	32000	64000	128000	256000	512000	1024000
19462	38924	77785	155698	311396	622792	1245584
2850	5700	11400	22800	45600	91200	182400
3462	6924	13785	27698	55396	110792	221584
506	1012	2025	4050	8100	16200	32400
612	1224	2385	4898	9796	19592	39184
90	180	360	720	1440	2880	5760
106	212	424	848	1696	3392	6784
16	32	64	128	256	512	1024



Rys. 5.19. Wykres pomocniczy umożliwiający dobór liczby cząstek określonego wymiaru proszku testowego Al_2O_3 . (Przykład: w 1 mg proszku znajduje się ok. $3 \cdot 10^4$ cząstek o wymiarze 25 μm . Kolejność postępowania a-b-c)

NAS 1638) jest wymagane określone zagęszczenie cząstek w badanej próbce (np. w odstoju lub w wirówce).

W celu uzyskania statystycznie wiarygodnych wyników badań, jest wymagana równoczesna szybka analiza przynajmniej trzech kropeł cieczy pobranych z próbki o objętości większej niż 10 ml. W przypadku nierównomiernego zagęszczenia cząstek w próbce należy przed analizą dokładnie je wymieszać. Dobre wyniki analizy uzyskuje się w przypadku czystości cieczy odpowiadającej 7÷12 klasie wg NAS 1638 przy zagęszczeniu w stosunku od 1 : 10 do 1 : 4.

Użycie płytek Bürkera umożliwia obserwację najmniejszej objętości odpowiadającej wymiarom $0,025 \times 0,25 \times 0,1$ mm. Praktycznie obserwacje są prowadzone na kilku polach o wymiarach $0,2 \times 0,2$ mm i wysokości 0,1 mm.

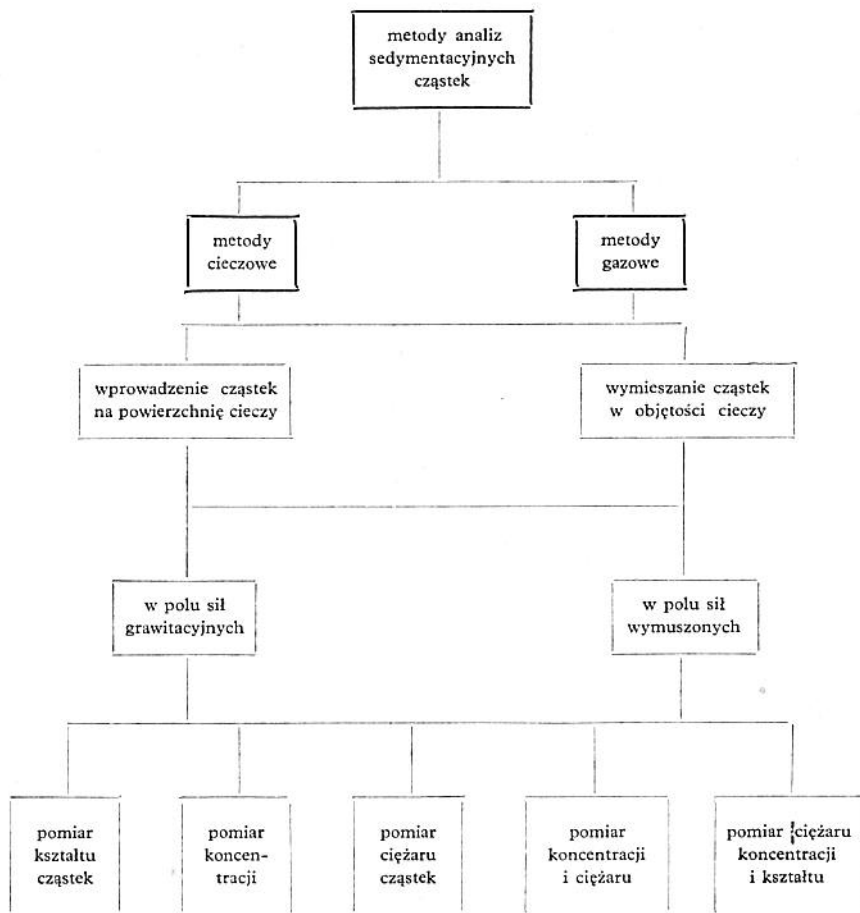
Metoda liczenia polega na: przygotowaniu próbki do badań (zagęszczeniu), dobraniu układu optycznego mikroskopu, cechowaniu mikroskopu (przy założonym zespole fotograficznym), dobraniu optymalnego oświetlenia (kontrastu) i czasu naświetlania, fotografowaniu próbki, obróbce filmu, wywołaniu zdjęć i ich analizie.

Wykonanie zdjęć mikroskopowych można przeprowadzić w zasadzie przy użyciu seryjnych mikroskopów z przystawką fotograficzną. Fotografowanie próbek cieczy z zanieczyszczeniami lub samych zanieczyszczeń jest łatwe w przypadku, gdy badania dotyczą cząstek powyżej 5 μm .

5.3.4. Metody sedymentacyjne

Z pośrednich metod określenia rozkładu wymiarowego cząstek zanieczyszczeń (składu granulometrycznego), najbardziej jest rozpowszechniona *metoda sedymentacji*. Zasada pomiaru jest oparta na zależności między prędkością osadzania się (sedymentacji) jednorodnych cząstek w środowisku lepkiem a ich wymiarami. Zazwyczaj wykorzystuje się zjawisko osadzania się cząstek stałych pod wpływem sił grawitacyjnych. W celu określenia składu granulometrycznego zanieczyszczeń składających się z bardzo małych cząstek (około 2÷3 μm), stosuje się ze względu na powolne ich osadzanie się w polu naturalnej siły ciężkości — sedymentację w polu sił wymuszonych. Zaletą metody sedymentacyjnej jest stosunkowo prosta aparatura, możliwość dostosowania jej do szerokiego zakresu wymiarów cząstek, zadawalająca dokładność oraz przetwarzalność wyników. Konkretnie konstrukcje przyrządów ulegają modyfikacji w zależności od charakteru, potrzeb i celu badań.

Ogólną klasyfikację metod sedymentacyjnych podano na rys. 5.20.



Rys. 5.20. Klasyfikacja metod sedymentacyjnych

W metodzie sedymentacyjnej przy spełnieniu warunku, że środowisko rozpraszające w czasie doświadczenia jest niezmiennie, mogą występować dwa przypadki:

1) przed początkiem doświadczenia dyspersyjna zawiesina jest równomiernie rozmieszczona tak, aby w początkowym momencie dowolna cząstka stała z jednakowym prawdopodobieństwem znajdowała się w dowolnym miejscu środowiska rozpraszającego, a w szczególności na dowolnej wysokości sedymentacyjnej objętości: sedymentacja zachodzi w każdym elemencie objętości badanego środowiska;

2) środowisko rozpraszające nie zawiera stałej fazy, a badany materiał w początkowym okresie wprowadza się na odkrytą powierzchnię w postaci małej porcji zawiesiny; sedymentacja wszystkich cząstek zaczyna się od tej powierzchni.

Granulometryczny skład może być określony za pośrednictwem pomiaru na zadanej wysokości pomiarowej koncentracji fazy stałej, gęstości zawiesiny i masy osadu w funkcji czasu.

Podstawowe wymagania dotyczące warunków przeprowadzenia analizy sedymentacyjnej:

1) konieczne jest, jak w każdym dokładnych pomiarach, aby przyrząd pomiarowy wywierał jak najmniejszy wpływ na proces sedymentacji i w związku z tym zapewniał uzyskanie wysokiej dokładności pomiaru;

2) konieczne jest zabezpieczenie spokojnego stanu cieczy, wykluczającego niezamierzone przemieszczenie się cząstek w cieczy;

3) konieczne jest zmniejszenie do minimum lub wyrugowanie zjawiska agregacji, tj. skupiania się cząstek.

Ciecz dobieramy tak, aby jej gęstość była optymalna dla przeprowadzenia analizy, tzn. aby większe cząstki osadzały się nie za szybko, a mniejsze nie za wolno.

Przy założeniu kulistych kształtów cząstek siła ciężkości

$$G = \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_1 - \rho_2) g \quad (5.18)$$

natomiast siła oporu

$$W = 6\pi\mu vr \quad (5.19)$$

gdzie: r — promień cząstki, ρ_1 — gęstość właściwa cząstki, ρ_2 — gęstość właściwa cieczy, g — przyspieszenie ziemskie, μ — współczynnik lepkości dynamicznej, v — prędkość ustalona cząstki.

W ruchu ustalonym prędkość ustalona cząstki jest równa ilorazowi drogi (wysokości pomiarowej) H przez czas t

$$v = \frac{H}{t} \quad (5.20)$$

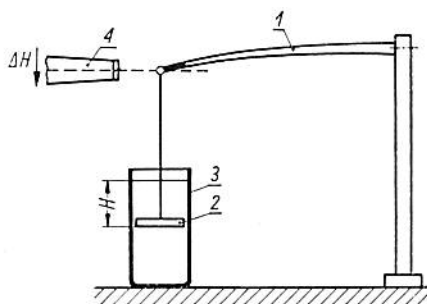
a więc promień cząstki

$$r = \sqrt{\frac{9}{2} \frac{\mu}{g} \frac{H}{(\rho_1 - \rho_2) t}} \quad (5.21)$$

przyjmując μ w $g/(cm \cdot s)$, H w cm , g w cm/s^2 , t w s , v w cm/s , r w μm , otrzymamy

$$r = 675 \sqrt{\frac{\mu}{\rho_1 - \rho_2}} \sqrt{\frac{H}{t}} \quad (5.22)$$

Metoda sedymentacyjno-wagowa. Parametry H i t określa się na stanowisku przekazanym schematycznie na rys. 5.21. Szklane ramię 1 dźwigni jest połączone z drążkiem tarczy 2 zanurzonej na głębokości H w naczyniu 3 z cieczą. Początkowe położenie końca



Rys. 5.21. Waga szklana do analizy sedymentacyjnej

dźwigni określa się mikroskopem 4 (położenie zerowe). Następnie podczas opadania zanieczyszczeń określa się czas ugięcia końca dźwigni w jednostkach podziałki mikroskopu. Na podstawie uzyskanych wyników wykreśla się krzywą przedstawiającą zależność ugięcia dźwigni pod wpływem ciężaru osiadających zanieczyszczeń w funkcji czasu. Przykładowy wykres tego typu (tzw. *krzywą sedymentacji*) pokazano na rys. 5.22.

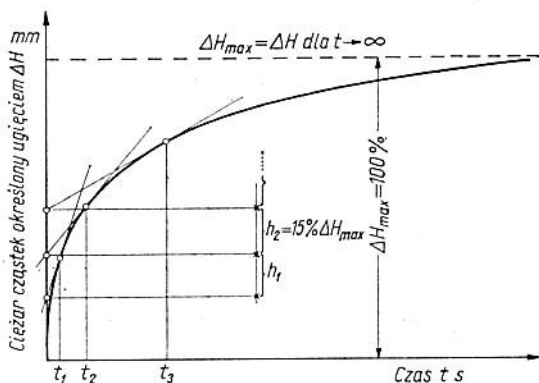
Analizę graficzną przeprowadza się następująco:

— na otrzymanej krzywej wybiera się kilka punktów, przez które prowadzi się styczne do przecięcia z osią rzędnych;

— przez punkt leżący na końcu krzywej (niewidoczny na rys 5.22) prowadzi się styczną równoległą do osi odciętych aż do przecięcia z osią rzędnych; odcinek osi rzędnych zawarty między początkiem układu współrzędnych a ww. punktem przecięcia wyraża ugięcie dźwigni pod całym ciężarem zanieczyszczeń (czyli $\Delta H_{max} = 100\%$);

— każdemu odcinkowi osi rzędnych wyznaczonemu przez odpowiednie styczne przyporządkowuje się liczbę wyrażającą w pro-

centach jego długość w stosunku do długości całego odcinka ΔH_{max} (np. $h_2 = 15\% \Delta H_{max}$), a więc wyraża się w ten sposób w procentach część całkowitego ciężaru zanieczyszczenia reprezentowaną przez ten odcinek;



Rys. 5.22. Krzywa sedymentacji

— dla wybranego punktu na krzywej określa się czas t opuszczania się dźwigni i odpowiadającą mu głębokość H łącznie z poprawką ΔH .

Stąd otrzymujemy wzór na minimalny, ekwiwalentny promień cząsteczki frakcji odpowiadający danemu punktowi krzywej

$$r = k \sqrt{\frac{H + \Delta H}{t}} \quad (5.23)$$

przy czym

$$k = 675 \sqrt{\frac{\mu}{\rho_1 - \rho_2}} \quad (5.24)$$

Wzór (5.23) umożliwia określenie, jaką część w procentach stanowi dana frakcja (o promieniu r) w stosunku do ogólnej ilości zanieczyszczeń.

Wady powyższej metody są następujące:

— dostateczną dokładność pomiaru uzyskuje się tylko przy niewielkich prędkościach opadania cząstek, a więc przy stosunkowo małych cząsteczkach (mniejsze od $100 \mu\text{m}$),

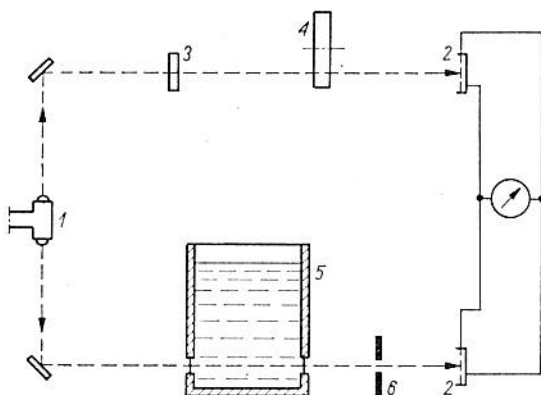
— pomiary są bardzo pracochłonne,

— stanowisko pomiarowe jest bardzo czułe na uboczne zakłócenia (mechaniczne, termiczne),

— przy małej różnicy $\rho_1 - \rho_2$ pomiary są niedokładne.

Metoda fotosedymentacyjna. Zasada pomiaru polega na tym, że promień świetlny jest rozszczepiany za pomocą układu pryzm na dwa promienie, z których jeden przechodzi przez ciecz badaną (zanieczyszczoną), a drugi — przez ciecz wzorcową (czystą). Promienie te padają na dwa fotoelementy o jednakowych charakterystykach. Różnica jasności światła tych promieni określa więc pole przekroju poprzecznego cząstek znajdujących się na poziomie promienia przechodzącego przez badaną ciecz. Różnica jasności światła jest więc równoważna wielkości ΔH z poprzedniej metody. Pomiar i opracowanie wyników badań przeprowadza się analogicznie jak w poprzedniej metodzie.

Schemat pomiarowy jednej z odmian tej metody z zastosowaniem fotokolorymetru przedstawiono na rys. 5.23. Fotokolorymetr reagujący na zmianę gęstości optycznej służy do określenia koncentracji roztworów wg intensywności barwy. Promień świetl-



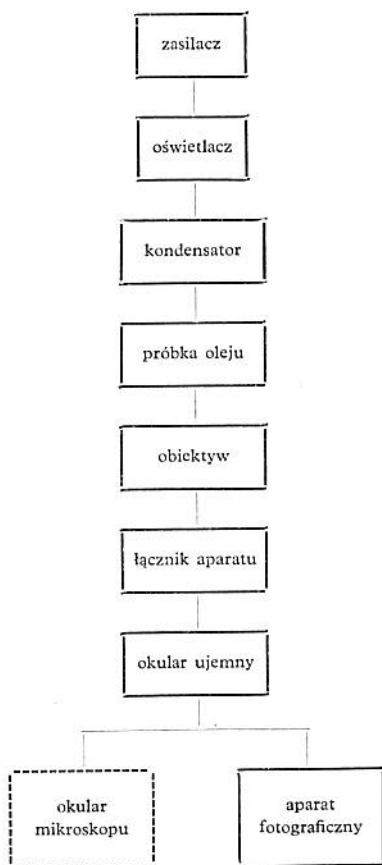
Rys. 5.23. Schemat układu pomiarowego z zastosowaniem fotokolorymetru

ny ze źródła 1 przez układ kondensatorów jest skierowany na dwa fotoelementy 2. Wielkość wiązki jednego strumienia świetlnego przechodzącego przez filtr świetlny 3 reguluje się klinami 4. Wielkość wiązki drugiego strumienia przechodzącego przez badaną ciecz 5 reguluje się diafragmą szczelinową 6. Fotoelementy są połączone różnicowo.

Po nalaniu cieczy i jej wymieszaniu włącza się stoper i za pomocą klinów fotometrycznych 4 zrównuje się wielkość obu strumieni świetlnych. Wskazanie galwanometru wyznacza w czasie zmianę gęstości optycznej cieczy z zanieczyszczeniami w porównaniu z niezmienną gęstością optyczną klinów fotometrycznych.

Wyniki pomiarów opracowuje się podobnie jak w poprzedniej metodzie.

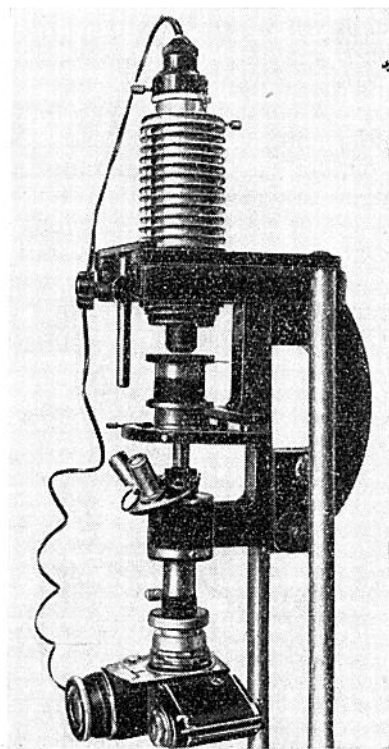
Metoda odwróconego mikroskopu. Jedną z doskonalszych metod umożliwiającą, określenie ciężaru, kształtu, liczby i koncentracji cząstek jest metoda z zastosowaniem odwróconego mikroskopu (mikroskopu sedymentacyjnego). Schemat blokowy takiego mikroskopu (rys. 5.24) opiera się na połączeniu zespołów typowych: zasilacza, oświetlacza, kondensora, obiektywu i okularu „ujemnego”. Zastosowanie kondensora umożliwia dostarczenie do układu optycznego mikroskopu równoległej wiązki promieni zapewniającej mierne oświetlenie badanej próbki. Zastosowanie zasilacza umożliwia natomiast uzyskanie kontrastowego obrazu (możliwości regulacji natężenia światła). Rozmieszczenie zanieczyszczeń w da-



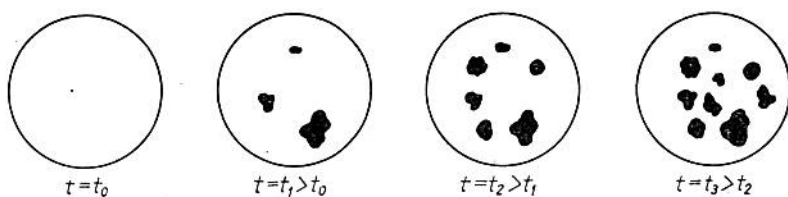
Rys. 5.24. Schemat blokowy mikroskopu sedymentacyjnego

nej chwili może być sfotografowane lub filmowane (oraz obserwowane przez okular mikroskopu). Przez zastosowanie w łączniku aparatu fotograficznego okularu ujemnego jest możliwe uzyskanie dużych powiększeń na kliszy fotograficznej.

Analizę cieczy roboczej metodą odwróconego mikroskopu przeprowadza się w następujący sposób. Próbkę oleju, o objętości np. 50 ml każda, są pobrane ze stoiska pomiarowego np. przed i za filtrem podczas pracy układu. Próbkę można obserwować w okularze mikroskopu albo w specjalnej przystawce pryzmatycznej aparatu fotograficznego. Należy wykonać cykl zdjęć w określonych odstępach czasu. Wykorzystując zasadę sedymentacji cząstek o większym ciężarze, można rejestrować proces opadania cząstek. Kolejne zdjęcia będą przedstawiały rozmieszczanie cząstek zanieczyszczeń o coraz to mniejszym ciężarze (wraz ze zmniejszeniem się ciężaru cząstek czas ich osadzania się rośnie). Na wykonanych zdjęciach, znając powiększenie układu optycznego, można określić wymiary poszczególnych cząstek, ich koncentrację, ilość oraz kształt. Wygląd zewnętrzny mikroskopu przystosowanego do ba-



Rys. 5.25. Widok mikroskopu sedymentacyjnego



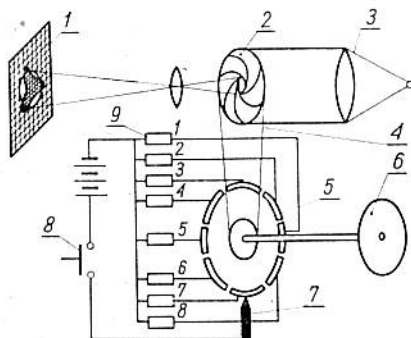
Rys. 5.26. Kolejne fazy rejestracji osadzających się na dnie zanieczyszczeń

dań zanieczyszczeń z wykorzystaniem sedymentacji przedstawiono na rys. 5.25, a kolejne fazy osadzania się zanieczyszczeń rejestrowane w czasie na kolejnych zdjęciach fotograficznych — na rys. 5.26.

5.3.5. Półautomatyczny analizator cząstek

W celu usprawnienia analizy mikroskopowej osadu, a ściślej jego fotografii, stosuje się m.in. specjalne urządzenia pomocnicze. Jednym ze stosowanych rozwiązań jest *analizator wielkości cząstek systemu F. Endtera*. Schemat ideowy tego urządzenia przedstawiono na rys. 5.27.

W urządzeniu tym umieszcza się na płycie 1 powiększoną (znacznie) fotografię osadu. Na płycie tej jest jednocześnie odwzorowana, za pomocą układu optycznego ze źródłem światła 3, średnica przysłony 2. Pomiaru dokonujemy zmieniając ręcznie pokrętką 6 średnicę przysłony tak, aby jej obraz na płycie 1 pokrywał się ze średnicą badanej cząstki. Zmiana średnicy przysłony jest sprzężona cięgnem 4 z kolektorem 5. Po zrównaniu wielkości cząstki z obrazem przesłony uruchamia się przycisk 8, który przez szczotkę kolektora 7 doprowadza impuls na wybrany licznik 9.

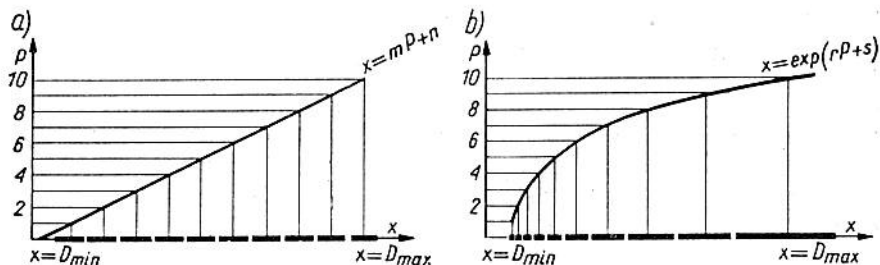


Rys. 5.27. Analizator wielkości cząstek TGZ3 (OPTON)

Wybór licznika zależy od położenia kolektora, czyli od wielkości badanej cząstki.

Podstawową zaletą tego analizatora jest to, że wymagania w zakresie rozmieszczenia cząstek i ich jasności na fotografii są tylko takie, aby kształty i zarysy cząstek były dostrzeżone okiem. Cząstki, które często zarysowują się tylko konturami, mogą się dotykać, przecinać lub nawet nakładać, cząstki wydłużone mogą być mierzone wzdłuż ich długości lub szerokości, a mieszaniny cząstek różnego rodzaju mogą być analizowane z podziałem na składniki. Ponieważ w procesie pomiarowym bierze udział oko, najmniejsze mierzone na obrazie cząsteczki powinny być możliwie nie mniejsze niż 1 mm. Opisany przyrząd ma dwa zakresy pomiarowe. Pierwszy umożliwia mierzenie wymiarów cząstek od 1,0 do 9,2 mm, a drugi od 1,2 do 27,7 mm. W zależności od wartości granicznych tych zakresów należy wybrać powiększenie zdjęcia. Wielkości cząstek dzieli się na 48 zakresów wymiarowych. Przyrząd jest wyposażony w pojedyncze liczniki oraz w licznik sumaryczny, który rejestruje liczbę wszystkich liczonych cząstek. Wybór zakresów wymiarowych cząstek zależy od przeznaczenia i dokładności pomiarowych.

W celu podziału cząstek na różne zakresy wymiarowe, liczbę cząstek przypadającą na te poszczególne zakresy należy przenieść bezpośrednio na krzywą rozkładu. Wadą takiego podziału jest to,



Rys. 5.28. Zależność między średnicą cząstki a numerem licznika P : a) dla stałego zakresu wymiarowego podziałki jednostkowej, b) dla wykładniczo wzrastającego zakresu wymiarowego podziałki jednostkowej; m , n , r , s — stałe urządzenia

że względna dokładność, z jaką scharakteryzowano wymiar cząstki przez zaszerogowanie go do pewnego zakresu wymiarowego, jest znacznie mniejsza w przypadku cząstek mniejszych niż większych. Przy użyciu 48 liczników, zakres pierwszy zawiera cząstki, których średnice mogą się między sobą różnić o około 30%, podczas gdy w ostatnim zakresie są zawarte tylko takie cząstki, których średnice różnią się maksymalnie o 2%. W celu uzyskania jednakowej

względnej dokładności liczenia cząstek w poszczególnych zakresach, szerokość tych zakresów musi więc wzrastać wraz z ich numerem. Wyjaśnia to przedstawiony na rys. 5.28 schemat podziału na 10 zakresów.

Jeśli liczy się cząstki przy wzrastającej szerokości podziałki jednostkowej, co jest zalecane dla dokładniejszego uchwycenia mniejszych cząstek, liczb odczytanych z liczników nie można nanieść bezpośrednio na wykres, ponieważ doprowadziłoby to do zniekształcenia krzywej rozkładu. Zgodnie bowiem z definicją każdej wartości rzędnej na krzywej rozkładu jest przyporządkowany stały odcinek odciętej.

5.4. Urządzenia skanujące

5.4.1. Optyczne czujniki analizujące

Działanie *optycznych czujników analizujących* opiera się na zmianie kształtu fali świetlnej po przejściu przez mikroobiekt, spowodowanej interferencją fali padającej (zwanej pierwotną) z falą przechodzącą (wtórną). Fale wtórne pojawiają się na skutek drgań elektronów i jonów tworzących mikroobiekt i powstają pod wpływem pola fali pierwotnej.

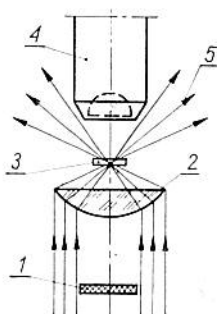
Jeśli porównamy falę pierwotną z falą uzyskaną w wyniku interferencji, to zachodzące przy tym zmiany fal sprowadzają się do: zmniejszenia amplitudy, zmiany fazy, zmniejszenia częstotliwości oraz zmian przestrzennej orientacji wektorów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego.

Zmniejszenie amplitudy zależy przede wszystkim od zdolności absorpcyjnych światła substancji danego mikroobektu. Znając zmianę amplitudy fali pierwotnej i fali uzyskanej po przejściu przez mikroobiekt można określić własności absorpcyjne mikroobektów. Pomiaru te są nazywane *pomiarami fotometrycznymi mikroobektów*. Różnorodne substancje wchodzące w skład mikroobektów tworzą różnorodne, charakterystyczne dla nich widma absorpcyjne (rys. 5.2).

Zmiana fazy fali świetlnej po jej przejściu przez mikroobiekt jest podstawą takich metod analizowania, jak metoda ciemnego pola, metoda kontrastu fazowego i metoda interferencyjna. Istnieje grupa mikroobektów odróżniających się od otaczającego środowiska tylko współczynnikiem załamania światła (zmiana fazy). Takie mikroobiekty nie zmieniają amplitudy przechodzącego przez nie światła. Są one przezroczyste i dlatego niewidoczne dla na-

szych oczu. Ażeby taki obiekt uczynić widzialnym, należy przekształcić zmiany fazowe fali pierwotnej na zmiany amplitudowe (rys. 5.3). Do tego celu służy *metoda ciemnego pola* polegająca na zmniejszeniu amplitudy fali 2, czyli przy zmniejszeniu amplitudy a nie można pominąć wpływu amplitudy b (rys. 5.3b).

Zmniejszenie amplitudy fali 2 wymaga zastosowania do oświetlenia mikroobiekту specjalnego kondensora ciemnego pola (rys. 5.29). Kondensator ciemnego pola dopuszcza do mikroobiekту część wiązki strumienia światła oświetlając go z boku promieniami



Rys. 5.29. Oświetlenie mikroobiekтуw przy metodzie ciemnego pola; 1 — przyślona, 2 — kondensator, 3 — preparat, 4 — obiektyw, 5 — strumień świetlny

tworzącymi nieznacznie pochylony stożek. Metoda ta wymaga silnych źródeł światła. Ponadto obraz często jest niewyraźny na skutek rozproszenia światła. Stąd też metoda ciemnego pola służy raczej do wykrywania obecności mikroobiekтуw niż do analizy ich rzeczywistego kształtu.

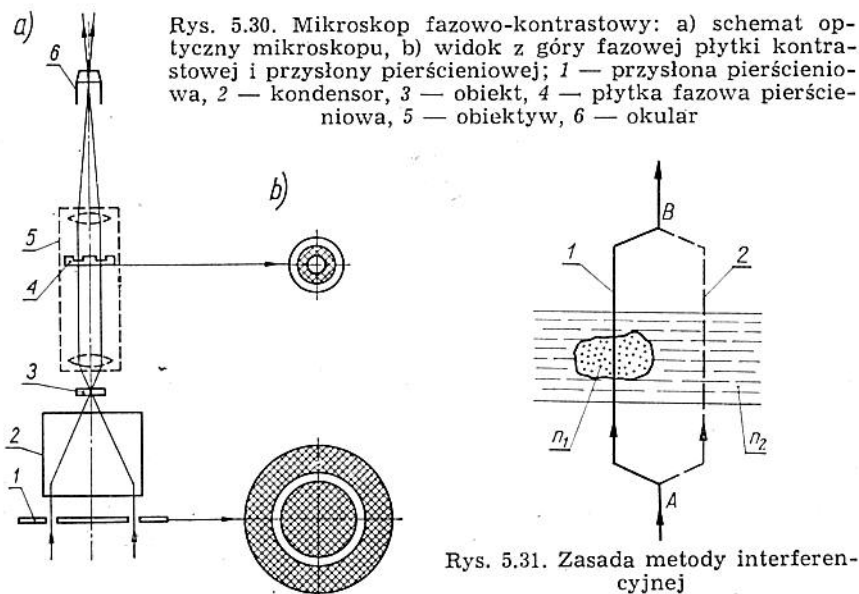
Bardziej korzystną energetycznie metodą jest *metoda kontrastu fazowego*. Zakładamy, że przez wytworzenie odpowiednich warunków uda się nam przesunąć sinusoidę 3 o $\pi/2$ (rys. 5.3). Wtedy sinusoidy 3 i 2 znajdą się w fazie lub w przeciwfazie przy przesunięciu o $\pi/2$. Amplitudę krzywej wypadkowej można zapisać jako sumę krzywych 2 i 3, tzn. $a \pm b$. Strumień świetlny $\Phi_1 = (a \pm b)^2$ i dla $a \gg b$; $\Phi_1 = a^2 \pm 2ab$, zaś strumień świetlny nie przechodzący przez mikroobiekт $\Phi_2 = a^2$. W ten sposób strumień świetlny przechodzący przez mikroobiekт różni się od strumienia świetlnego przechodzącego przez pozostały obszar i mikroobiekт staje się widzialny. W pierwszym przypadku $\Phi_1 > \Phi_2$, tzn. mikroobiekт jest jaśniejszy od tła. W drugim przypadku $\Phi_1 < \Phi_2$, tzn. mikroobiekт jest ciemniejszy od tła. Metodę powyższą realizuje się za pomocą *mikroskopu fazowo-kontrastowego* (rys. 5.30).

Porównując metodę ciemnego pola i metodę kontrastu fazowe-

go należy pamiętać, że w metodzie kontrastu fazowego intensywność strumienia światła jest proporcjonalna do przesunięcia fazy, a w metodzie ciemnego pola — do kwadratu przesunięcia fazowego.

Znacznie jeszcze lepszą metodą analizy mikroobektów jest metoda interferencyjna.

Zasadę metody interferencyjnej pokazano na rys. 5.31. Promień świetlny w punkcie A dzieli się na dwa promienie 1 i 2. Promień 1 przechodzi przez przesuwający się w fazie obiekt o współ-



czynniku załamania światła n_1 i grubości d , a promień 2 — przez substancję o współczynniku załamania n_2 . W punkcie 3 oba promienie spotykają się i interferują.

Zmniejszenie częstotliwości fali wtórnej w stosunku do pierwotnej oświetlającej mikroobekt stanowi podstawę analizy fotoluminescencyjnej.

Zmiana orientacji przestrzennej wektorów natężenia pola elektrycznego umożliwia analizowanie polaryzacyjnej struktury mikroobektów (*mikroskopy polaryzacyjne*).

Do mikroobektów mających własności polaryzacyjne zalicza się prawie wszystkie mikroobekty biologiczne, kryształy, odłamki skał, chemikalia, tzn. substancje charakteryzujące się wysokim stopniem orientacji molekularnej.

5.4.2. Mikroskopy skanujące

Dla usprawnienia obróbki informacji o mikroobiekcie konieczne jest przekształcenie obrazu optycznego w zbiór sygnałów elektrycznych i elektroniczne opracowanie wyników. Urządzenia realizujące takie przekształcenie informacji nazywamy *mikroskopem skanującym* (rys. 5.4). *Operacja skaningu* polega na kolejnym określaniu intensywności strumienia świetlnego w każdym punkcie preparatu. Metoda ta może być realizowana np. za pomocą przesuwającej się przysłony 5 i fotopowielacza 6. Przy czym ważniejsze jest tu zagadnienie elektronicznego opracowania wyników, gdyż do części optycznej może być użyty jeden z wymienionych w tablicy 5.3 mikroskopów.

Nie wszystkie rodzaje badań optycznych są zautomatyzowane w równym stopniu. Większość urządzeń automatycznych jest budowana z wykorzystaniem zwykłego mikroskopu optycznego ze zmieniającym się oświetleniem. Automatyzuje się również takie metody badań optycznych jak luminescencyjna, interferencyjna i polaryzacyjna.

W urządzeniach mikroskopu skanującego stosuje się różnorodne przetworniki wideo-elektryczne. *Próg kontrastowości* rozumiany jako znormalizowana różnica intensywności światła mikroobiekta i fazy rozpraszającej decyduje o wyborze takiego przetwornika. Stosowane obecnie przetworniki mają następujące progi

Tablica 5.3. Rodzaje mikroskopów do badań zanieczyszczeń

Optyczne własności mikroobektów	Rodzaj mikroskopu umożliwiającego badanie tych własności	Zdolność rozdzielcza mikroskopu μm
Absorpcja	zwykły mikroskop optyczny	0,2–0,3
Przesuwanie w fazie	mikroskop z ciemnym polem mikroskop z kontrastem fazowym mikroskop interferencyjny	0,5–0,7 0,3–0,5 długość i szerokość 0,3–0,5 grubość 0,03
Fotoluminescencja	mikroskop luminescencyjny	0,2–0,3
Polaryzacja	mikroskop polaryzacyjny	0,2–0,3

kontrastowości (dla porównania oko ludzkie ma próg kontrastowości 10—20): Vidicon 5—10, Plumbicon 10—30; komórka fotoelektryczna 30—50, powielacz 100—300.

Trudności wynikające przy konstrukcji mikroskopu skanującego są związane również z koniecznością uzyskania informacji od elementów o powierzchni 10^{-7} mm² przy zachowaniu właściwego stosunku sygnału pomiarowego do szumu, w celu osiągnięcia wymaganego progu kontrastowości. Otrzymanie świetlnego strumienia z takich płaszczyzn jest zadaniem trudnym i intensywność oświetlenia uzyskanego nawet z silnych źródeł nie zawsze jest dostateczna.

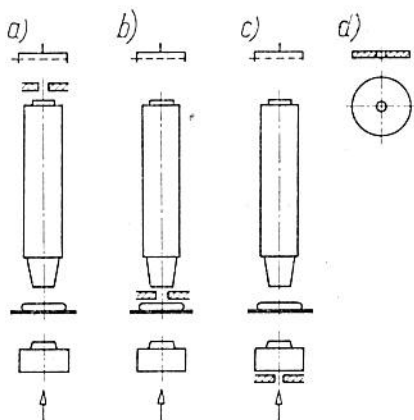
W rezultacie skaningu zmiana intensywności światła jest przekształcana w sygnał elektryczny będący funkcją czasu.

Praktycznie realizacji skaningu dokonuje się przez kwantowanie wg amplitudy. Nieprzerwany obraz świetlny, sprowadza się do zbioru dyskretnego wielkości w punktach odczytu. Wielkości te można zakodować, np. w systemie dwójkowym i w takiej formie wprowadzić do maszyny liczącej dla dalszego opracowania.

5.4.3. Metody skanowania

Istnieją dwie grupy metod skanowania. Pierwsza grupa metod uwzględnia położenie względem siebie źródła światła, preparatu, ruchomej przysłony i fotoelementu, natomiast druga grupa — wzajemny stosunek wymiarów przysłony i mikroobektów.

1) Metody uwzględniające położenie ruchomej przysłony (rys. 5.32):



Rys. 5.32. Metody skanowania z uwzględnieniem położenia ruchomej przysłony (diafragmy): a) w płaszczyźnie obrazu, b) w płaszczyźnie preparatu, c) w płaszczyźnie źródła światła, d) ruchoma przysłona

- skanowanie w płaszczyźnie obrazu,
- skanowanie w płaszczyźnie preparatu,
- skanowanie w płaszczyźnie źródła światła.

Skanowanie w płaszczyźnie obrazu (rys. 5.32a) polega na tym, że przesuwaną się przysłona znajduje się w płaszczyźnie obrazu preparatu, bezpośrednio przed fotoelementem. Przy zmianie położenia przysłony zmienia się natężenie strumienia świetlnego przechodzącego przez otwór skanujący przysłony zależnie od strumienia świetlnego obrazu, powodując zmianę natężenia prądu przetwornika wideo-elektrycznego.

Przy *skanowaniu w płaszczyźnie preparatu* (rys. 5.32b) ruchoma przysłona znajduje się pod mikroskopem. Przy tej metodzie otwór skanujący powinien być tym mniejszy im większe jest powiększenie mikroskopu. Dla dużych powiększeń ($100 \div 500\times$) istnieją duże trudności w przygotowaniu przysłon skanujących z bardzo małymi otworami.

Przy skanowaniu w płaszczyźnie źródła światła wykorzystuje się przysyłanie źródła strumienia świetlnego. Obraz wielkości otworu przysłony przesuwa się jako plamka świetlna małych rozmiarów. Metoda ta często ma nazwę „biegnącego promienia”.

2) Metody uwzględniające wymiary elementu skanującego.

Otwór przysłony może mieć dowolny kształt (np. koła, kwadratu lub prostokąta). W zależności od stosunku największego wymiaru liniowego d otworu przysłony do maksymalnego wymiaru obrazu mikroobektu D , sprowadzonych do jednej płaszczyzny skanowania, wyróżniamy trzy przypadki:

— gdy $d/D \gg 1$ — przypadek ten prowadzi do pomiaru całkowitego strumienia świetlnego, dzięki czemu można określić jedynie powierzchnię mikroobektów; w granicznym przypadku tej metody, przysłona skanująca jest zbędna;

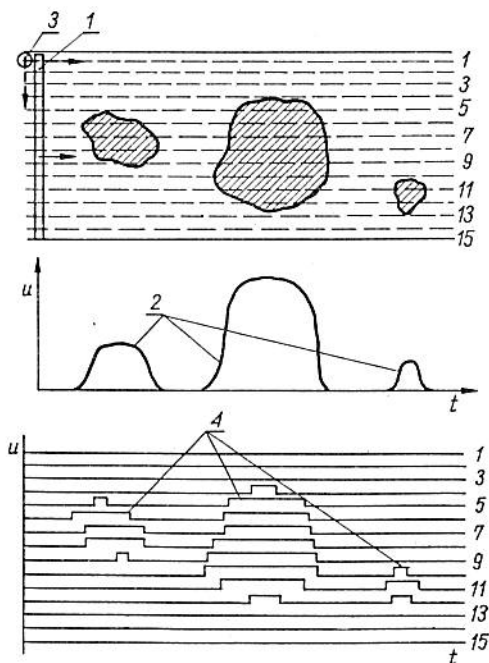
— gdy $d/D \gg 1$ — przypadek jest nazywany „szerokim pasmem”; umożliwia on określenie liczby mikroobektów i ich wymiarów (rys. 5.33);

— gdy $d/D \ll 1$ — przypadek jest nazywany „wąskim pasmem”; umożliwia on nie tylko określenie liczby mikroobektów i ich parametrów geometrycznych, lecz również uzyskanie danych o ich budowie (rys. 5.33).

Urządzenia skanujące można podzielić na trzy grupy: elektronowe, mechaniczne i płynowe.

Urządzenia skanujące elektronowe są realizowane jako typowe systemy „biegnącego promienia” wykorzystujące telewizyjne urządzenia odbiorcze. Stosowane są też metody spektralnego badania mikroobektów mające nazwę „barwienia elektronowego” obrazu.

Urządzenia skanujące mechaniczne są zbudowane z wykorzystaniem obracających się pryzmatów, huśtających się lusterek, ruchomych przysłon i skanujących uchwytów próbek.



Rys. 5.33. Metody skanowania z uwzględnieniem wymiarów elementów skanujących (schemat analizy i kształty impulsów elektrycznych). Metoda szerokiego pasma: 1 — szczelina do analizy obrazu mikroobiekty, 2 — impulsy elektryczne na wyjściu fotoelementu; metoda wąskiego pasma: 3 — przysłona o małych rozmiarach do analizy obrazu (liniami 1-15 zaznaczone są ruchy otworu przysłony, 4 — impulsy elektryczne na odpowiednich pasmach

Wadami mechanicznych urządzeń skanujących są: zużywanie się części ruchomych i powolność analizy. Zaletami tych urządzeń są: prosta budowa, równomierna czułość wzdłuż całej analizowanej linii, możliwość pracy w różnych częściach widma.

Urządzenia skanujące płynowe stanowią oddzielną klasę urządzeń skanujących. Płyn przepuszcza się przez kapilarę umieszczoną między źródłem światła a fotopowielaczem. Jeżeli przed fotopowielaczem umieścimy przysłonę w ten sposób, aby w polu widzenia w danym momencie znajdowała się tylko jedna cząstka, to licznik otrzymujący sygnały od fotopowielacza będzie liczył ilość mikroobektów.

Kapilara powinna być dostatecznie wąska, aby zapobiec nakładaniu się impulsów. Z drugiej strony prędkość przechodzenia zawiesiny przez kapilarę jest wprost proporcjonalna do tej średnicy. Trudność zmierzenia cząstek jest spowodowana niestałą prędkością ich ruchu w kapilarze. W części centralnej poruszają się one szybko, a przy ściankach wolno z powodu tarcia cieczy o ścianki. Zatem długość impulsu na wyjściu fotopowielacza zależy nie tylko od rozmiaru cząstki, lecz i od położenia jej w kapilarze. Dlatego pomiar cząstek jest obciążony dużym błędem.

5.4.4. Ocena błędów

Największy wpływ na błąd mają zakłócenia w mikroskopie skanującym. Zakłócenia te prowadzące do błędów liczenia mikroobъекtów są związane zarówno z częścią optyczno-mechaniczną jak i z częścią elektroniczną. Należą do nich:

- defekty w układzie optycznym takie, jak rysy i kurz na powierzchni soczewek leżących w pobliżu przysłon,
- niestabilność i struktura źródła światła,
- defekty powstałe przy produkcji przysłon skanujących (np. rozrzut wielkości otworu),
- szumy fotoelementów i pierwszych kaskad kanału wizyjnego. Mogą one przewyższać próg dyskryminacji lub zmniejszyć amplitudę impulsu pomiarowego poniżej progu dyskryminacji.

Ponadto impulsy uzyskane na wyjściu mikroskopu skanującego, mogą być także zakłócane przez:

- niestałą charakterystykę toru sygnału wizyjnego,
- zjawiska dyfrakcyjne w mikroskopie,
- inne oddziaływania.

5.5. Komputerowy analizator obrazu „QUANTIMET 720”

5.5.1. Budowa przyrządu

Jednym z najlepszych urządzeń do stereometrycznych metod pomiaru cech geometrycznych mikroobъекtów jest telewizyjno-komputerowy analizator obrazu Quantimet 720 przeznaczony do automatycznego określania wybranych cech zdjęć fotograficznych oraz obrazów obserwowanych za pomocą układów elektronowych, rentgenowskich lub optycznych. Analizator rozpoznaje i wyodrębnia, a następnie liczy, mierzy i klasyfikuje dowolne cechy mikroobъекtów.

Analizator Quantimet 720 ma budowę modułową (blokową). Wybór ilości i rodzaju modułów zależy od zastosowania. Można więc przez zastosowanie analizatora otrzymać względnie prosty układ pomiarowy, obsługiwany ręcznie, bądź też układ w pełni zautomatyzowany, sterowany specjalnym urządzeniem programującym, umożliwiającym mierzenie większej liczby parametrów niż układ ręczny.

Każdy z modułów analizatora Quantimet 720 ma nazwę, która określa spełnianą przez niego podstawową funkcję. Niektóre z modułów mają specjalne wersje, umożliwiające otrzymanie najbardziej odpowiedniego w danym przypadku zestawu:

— wersja M — wysoka rozdzielczość i wyróżnialność poziomów szarości,

— wersja F — duża szybkość działania przyrządu,

— wersja S — mała szybkość działania przyrządu.

Większość modułów analizatora jest przystosowana do pracy we wszystkich trzech wersjach, lecz niektóre z nich będą przydatne tylko w wersjach M i S.

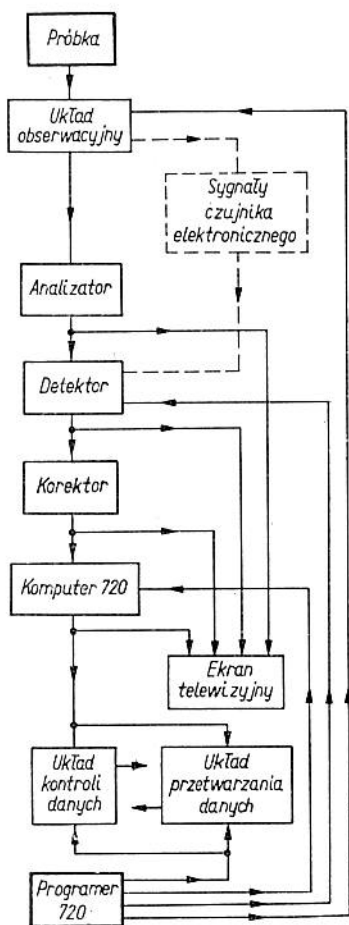
Analizator składa się z wielu zespołów podstawowych wyodrębnionych na ogólnym schemacie blokowym (rys. 5.34) i na schemacie szczegółowym (rys. 5.35). Przeznaczenie i budowę tych zespołów podstawowych omówiono poniżej.

Urządzenie wytwarzające i analizujące obraz. Mikroskop analizatora Quantimet 720 jest typowym mikroskopem stosowanym do badań. Stolik ma programowany ruch w kierunku x , y , z . W przypadku dużych obiektów i fotografii wykorzystuje się *epidioskop*. W przyrządzie Quantimet 720 zastosowano nowe analizatory obrazu (Vidicon i Plumbicon), które przetwarzają obraz telewizyjny na sygnały przystosowane do detektora 720. Analizatory te skonstruowane specjalnie mogą być zamocowane do wszystkich typów mikroskopów świetlnych i do większości typów mikroskopów elektronowych oraz 35 milimetrowych projektorów filmowych. Analizujące mikroskopy elektronowe, analizatory mikropróbek oraz inne urządzenia powolnej analizy, mogą być sprzężone bezpośrednio z układem analizatora 720, za pośrednictwem „modułu rozdziału układu”, bez zastosowania analizatora obrazu.

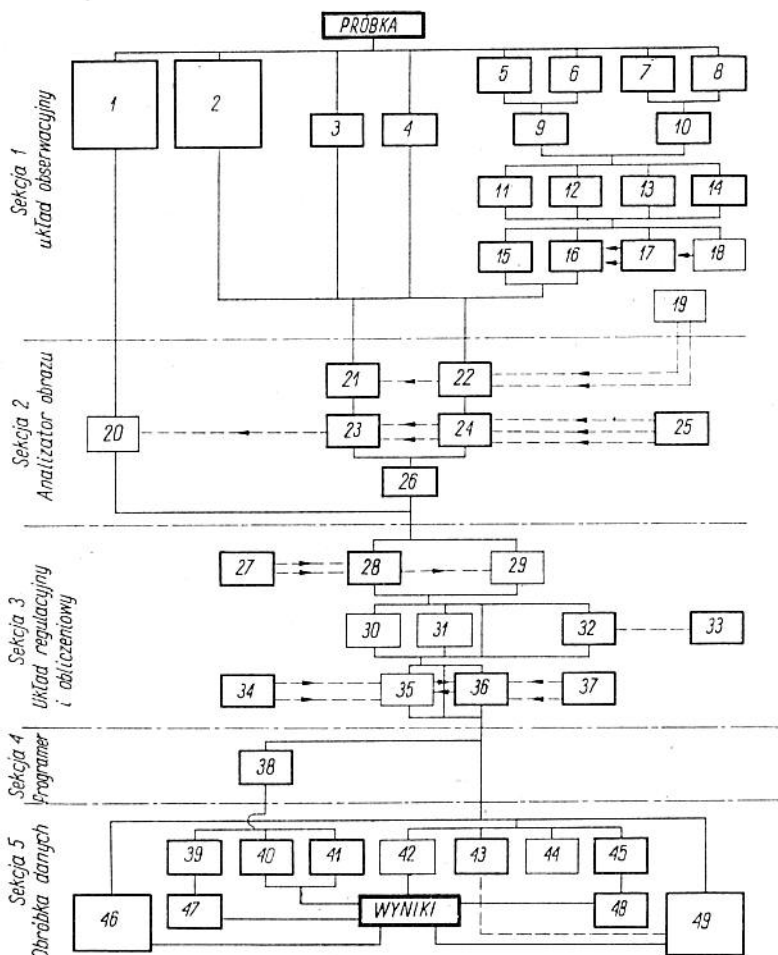
Detektory i korektory. Detektor 720 wybiera cechy niezbędne do przeprowadzenia pomiaru, zależnie od ich poziomu szarości. Regulacja jego rozdzielczości umożliwia obliczanie lub pomijanie takich szczegółów, jak rysy lub inne przypadkowe cechy, oraz dokonanie wyboru najbardziej wskazanego w danym przypadku rozwiązania kompromisowego między rozdzielczością a rozróżnialnością poziomów szarości. Regulacja ostrości tła zmniejsza rozmycie obrazu.

Korektor 720 umożliwia wytłumienie lub poprawienie wykrywalności obrazu, zmieniając go nieco lub „korygując”. Tak więc umożliwia np. wypełnienie białych otworów, które powinny być czarnymi, bądź też zgrupowanie sąsiednich cech obrazu w jedną całość.

Komputer i ekran. Standardowy komputer 720 liczy cechy obrazu oraz mierzy ich powierzchnię i dokonuje analizy rozkładu wymiarowego. Może także być wykorzystany do klasyfikacji cech mikroobektów pod względem innych kryteriów (długość, powierzchnia, kształt).



Rys. 5.34. Ogólny schemat blokowy przyrządu QUANTIMET 720 (Produkcja: IMANCO, Image Analising Computers Ltd., Anglia)



Rys. 5.35. Szczegółowy schemat blokowy komputerowego analizatora obrazu QUANTIMET 720 (Produkcja: Imanco, Anglia).

Szekcja 1: 1 — analizujący mikroskop elektronowy, mikroanalizator, stolikowy układ analizujący lub inny zewnętrzny analizator względnie zwykła kamera TV; 2 — transmisyjny mikroskop elektronowy, teleskop, mikroskop na specjalne promieniowanie lub inny zewnętrzny układ obserwacyjny; 3 — projektor filmowy 35 mm; 4 — epidiaskop; 5, 7 — zasilacz niestabilizowany; 6, 8 — zasilacz stabilizowany; 9 — lampa żarowa (halogenowa); 10 — lampa wyładowcza, 11 — mikroskop uniwersalny; 12 — mikroskop transmisyjny; 13 — mikroskop do badań w świetle odbitym; 14 — wyposażenie mikroskopowe; 15 — stolik o przesuwie ręcznym; 16 — stolik o przesuwie automatycznym; 17 — sterowanie ruchem X oraz Y stolika; 18 — sterowanie ruchem Z stolika; 19 — sterowanie obrotem obrazu.

Ekran 720 umożliwia uzyskanie 720 liniowego obrazu, z możliwością wprowadzenia do niego znaczników wizualnych. Umożliwia także wyświetlenie wyników wykonywanych pomiarów, w postaci cyfrowej, na dwóch polach ponad obrazem monitora. W niezajętej przez obraz części monitora można nałożyć, elektronicznie, skalę kalibracyjną.

Układy programowania i opracowywania danych. Realizacja najprostszego programu wymaga jedynie obrócenia wyłącznika i zapisania wyników pokazanych na ekranie 720. Bardziej złożone problemy wymagają zastosowania specjalnego urządzenia programującego 720, które dokonuje wyboru parametrów dla każdego pola widzenia. Wyniki pomiarów są wówczas natychmiast automatycznie zapisywane i anlizowane za pomocą jednego z kilku układów opracowywania i drukowania danych, po czym sterowany komputerem stolik przesuwa się do następnego pola widzenia. Program pracy komputera jest wybierany za pomocą tablicy kołkowej, przez umieszczenie kołków w odpowiednich gniazdach. Wymiana tablicy z programem trwa parę sekund, a nastawienie nowego programu — kilka minut.

Programowanie bardziej złożone wymaga wprowadzenia wzajemnego współdziałania pomiędzy modułami analizującymi obraz, w celu otrzymania różnych charakterystyk. Nowe moduły mogą być dołączone lub włączone pomiędzy istniejące moduły, dla uzyskania programu najbardziej odpowiedniego do realizacji danego zadania, np. dla osiągnięcia większych szybkości, większej rozróżnialności itd.

5.5.2. Własności przyrządu

Do głównych zalet analizatora Quantimet 720 należy możliwość określania liczby mikroobektów, pomiaru powierzchni i długości mikroobektów przy równoczesnym ich klasyfikowaniu pod wzglę-

Sekcja 2: 20 — moduł rozdziału układu; 21 — głowica analizatora Plumbicon; 22 — głowica analizatora Vidicon; 23 — układ sterowania analizatora Plumbicon; 24 — układ sterowania analizatora Vidicon; 25 — automatyczny korektor cienia; 26 — ekran.

Sekcja 3: 27 — regulator ramy i skali obrazu; 28 — detektor standardowy, 29 — detektory specjalne; 30 — współrzędna; 31 — gęstościomierz; 32 — korektor; 33 — dystrybutor wymiarowy; 34 — regulator ramy i skali obrazu; 35 — komputer specjalny; 36 — komputer standardowy; 37 — dystrybutor wymiarowy.

Sekcja 4: 38 — urządzenie programujące (programer).

Sekcja 5: 39 — napęd dalekopisu; 40 — kontroler 1; 41 — kontroler 3; 42 — odczyt sumatorowy; 43 — sumator wielokrotny; 44 — inne (na żądanie); 45 — napęd kalkulatora; 46 — odczyt cyfrowy na monitorze typu S.E.M.; 47 — dalekopis; 48 — kalkulator; 49 — odczyt cyfrowy na ekranie.

dem długości, powierzchni i kształtu oraz wykrywalność dużej ilości szarych odcieni. Dokładność pomiaru długości i powierzchni mikroobiektów wynosi $\pm 1\%$, gdy obiekty zajmują więcej niż 1% pola widzenia, przy czym dokładność zliczenia obiektów nie zależy od ich kształtów. Można również liczyć obiekty częściowo na siebie nałożone (np. krzyżujących się włókien). Przez wprowadzenie tzw. antykoincydencyjnego punktu (A.C.P.), nieruchomego względem badanego obiektu, można uniknąć dużych błędów obarczających wyniki pomiarów uzyskiwanych za pomocą układów z punktem ruchomym. W przyrządzie można łączyć równolegle lub szeregowo moduły równoważne sobie pod względem funkcjonalnym, co umożliwia rozwiązanie wielu trudnych zagadnień występujących w analizie obrazowej. Na przykład łącząc równolegle dwa detektory 720 można rozróżnić jednocześnie aż 8 poziomów szarości, a łącząc szeregowo dwa dystrybutory rozmiarowe 720 można kolejno zbadać rozkład mikroobiektów o 15 różnych rozmiarach.

Elektroniczna część przyrządu jest zbudowana na obwodach scalonych. Badane w danej chwili obiekty są wyróżniane ukazującymi się na ekranie znacznikami. Proste programy pracy są realizowane przez operatora dokonującego odpowiednich manipulacji na tablicy przyrządu lub przez włączenie do układu odpowiednio zaprogramowanej tablicy kołkowej. Tablic takich jest kilka, dzięki czemu najczęściej używane programy można przechowywać w stanie ciągłej gotowości, natomiast trudne programy pracy (programowanie na tzw. „wysokim poziomie”) wymagają zmian połączeń międzymodułowych oraz połączeń na specjalnych tablicach umieszczonych na tylnej ścianie każdego modułu. Za pomocą modułów (bloków) analizatora Quantimet 720 można zestawić ok. 1000 różnych układów pomiarowych. Wybierając najwłaściwszy z nich można uzyskać największe efekty przy najmniejszym koszcie. Firma Image Analysing Computers (IMANCO) opracowała zalecenia w zakresie doboru najwłaściwszego układu dla danego zastosowania. Należy zwrócić uwagę na to, że w celu zrealizowania układu pomiarowego jest konieczne zapewnienie przynajmniej jednego nieprzerwanego połączenia między blokami „próbka” oraz „wynik” rys. 5.35.

W tabl. 5.4 podano przykłady trzech układów o różnym stopniu złożoności, z których każdy składa się z 5 sekcji. Treść tej tablicy zawiera wykaz modułów wchodzących w skład każdej sekcji. Nie są to wszystkie moduły składające się na analizator Quantimet 720, lecz tylko te, które były niezbędne do zestawienia podanych w tablicy układów pomiarowych.

Zdolność rozdzielcza wymiarowa analizatora Quantimet 720 wynosi od kilku angstromów wzwyż, zależnie od układu obserwacyjnego, zdolność rozdzielcza liniowa — 720 poziomych linii zło-

Tablica 5.4. Przykłady trzech układów pomiarowych zestawionych z bloków (modułów) [121]

Układ Sekcja układu	Układ 1 (prosty, sterowany ręcznie, z minimalną ilością odczytów)	Układ 2 (bardziej wydajny niż układ 1)	Układ 3 (w pełni zautomatyzowany)
Sekcja 1: moduły układu obserwacyjnego i układu manipulowania próbką	<ul style="list-style-type: none"> — zwykły mikroskop — stolik przesuwany ręcznie zasilacz niestabilizowany 	<ul style="list-style-type: none"> — mikroskop uniwersalny 720 	<ul style="list-style-type: none"> — mikroskop uniwersalny 720 — zasilacz stabilizatora — stolik przesuwany automatycznie z układem sterowania — epidiaskop 720 — układ sterowania obrotem obrazu
Sekcja 2: moduły analizatora obrazu	<ul style="list-style-type: none"> — Vidicon 720 z układem sterowania — ekran 720 	<ul style="list-style-type: none"> — Vidicon 720 z układem sterowania — automatyczny kompensator cienia — ekran 720 	<ul style="list-style-type: none"> — Plumbicon 720 (2 szt.) z automatycznymi kompensatorami cienia — moduł rozdziału układu — ekran 720
Sekcja 3: moduły układu przetwarzającego obraz	<ul style="list-style-type: none"> — detektor standardowy 720 	<ul style="list-style-type: none"> — detektor standardowy 720 — korektor 720 — dystrybutor rozmiarowy 720 — komputer standardowy 720 z regulatorem ramy i skali obrazu 	<ul style="list-style-type: none"> — detektor standardowy 720 — korektor 720 — dystrybutor rozmiarowy 720 — komputer standardowy 720 — regulator ramy i skali obrazu
Sekcja 4: moduły układu programującego	<ul style="list-style-type: none"> — brak modułów (sterowanie ręczne za pomocą łączników) 	<ul style="list-style-type: none"> — 16 instrukcyjny programer 720 	<ul style="list-style-type: none"> — 16 instrukcyjny programer 720
Sekcja 5: moduły układu przetwarzania danych	<ul style="list-style-type: none"> Brak modułów (wyniki są podawane na sumującym liczniku cyfrowym ekranu komputerowego 720) 	<ul style="list-style-type: none"> — sumator 720 	<ul style="list-style-type: none"> — kontroler 720 — dalekopis 720 z napędem — sumator 720

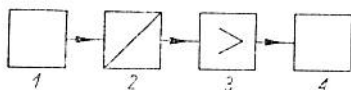
zonych każda z 890 punktów obrazowych oraz 650 000 punktów kwadratowych pokrywających obraz.

Prędkość liczenia wynosi od 8 do $61 \cdot 10^{-6}$ punktów obrazowych na sekundę, a czas liczenia jednego pola od 0,04 do 0,09 sekund. Liniowość analizatora i odczytu jest określona na 1% wartości bezwzględnej.

5.6. Analizatory zanieczyszczeń działające na zasadzie kontrastu elektrycznego

5.6.1. Uwagi ogólne

Wszystkie analizatory automatyczne zanieczyszczeń działające na zasadzie kontrastu elektrycznego mają schemat blokowy przedstawiony na rys. 5.36. Analizator taki składa się z czujnika pomiarowego 1, którego zadaniem jest wytworzenie impulsu sygnału od-



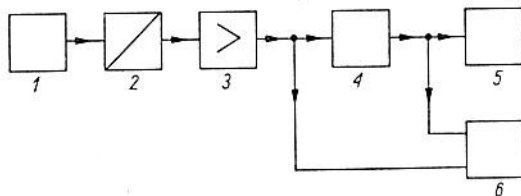
Rys. 5.36. Schemat blokowy automatycznego analizatora zanieczyszczeń

powiadającego parametrom wielkości cząstek zanieczyszczeń (ich wymiaru lub ilości). Zasada działania czujnika jest realizowana z wykorzystaniem różnych zjawisk fizyko-chemicznych. Rodzaj użytego czujnika określa metodą pomiarową. Stosuje się czujniki optyczne, elektryczne, kolmatacyjne, sedimentacyjne itp.

Wytworzony przez czujnik sygnał jest przetwarzany przez przetwornik 2 najczęściej na sygnał elektryczny, podawany następnie na wzmacniacz 3 i układ liczący 4 (najczęściej elektryczny). Czujnik może wytwarzać sygnał ciągły, jak np. w metodzie kolmatacyjnej, lub dyskretny, jak np. w czujniku optycznym i elektrycznym (na zasadzie kontrastu elektrycznego). Analizator z czujnikiem wytwarzającym na wyjściu sygnał ciągły nie dostarcza informacji o pojedynczej cząstce, lecz o sumie cząstek, jako całości. Analizator z czujnikiem wytwarzającym na wyjściu dyskretny sygnał dostarcza informacji o każdej cząstce. Każdej bowiem cząstce jest przypisany jeden lub nawet kilka sygnałów (jak np. w metodzie skanowania wąskim pasmem). Impulsy przekraczające pewien poziom ustalony przez dyskryminator są liczone za pomocą licznika. Przebieg cząstek może być obserwowany na oscyloskopie. Na

rys. 537 przedstawiono schemat analizatora z czujnikiem wytwarzającym sygnał dyskretny.

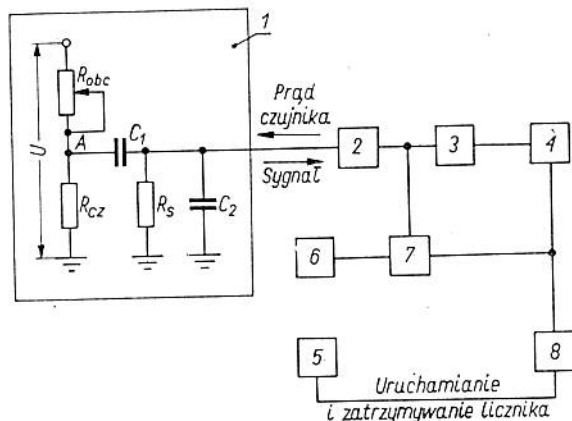
Zjawisko kontrastu elektrycznego polega na zmianie przewodności elektrolitu przy pojawieniu się między elektrodami cząstki o innej przewodności. Czujnik oparty na tym zjawisku ma nazwę



Rys. 537. Schemat blokowy automatycznego analizatora zanieczyszczeń z czujnikiem z wyjściem dyskretnym; 1 — czujnik pomiarowy, 2 — przetwornik, 3 — wzmacniacz, 4 — dyskryminator, 5 — licznik impulsów, 6 — oscyloskop

czujnika *konduktometrycznego*. Należy on do grupy czujników elektrycznych. Na jego wyjściu wytwarza się sygnał elektryczny, który z pominięciem przetwornika jest podawany na wzmacniacz i elektryczny układ liczący. Schemat takiego analizatora przedstawiono na rys. 538.

Pierwszy patent metody i przyrządu należy do W.H. Coultera (USA, 1953). Głównym właścicielem około 100 patentów jest amerykańska firma Coulter Electronics Inc. oraz zależna od niej firma



Rys. 538. Schemat analizatora z czujnikiem konduktometrycznym; 1 — czujnik, 2 — wzmacniacz wstępny; 3 — dyskryminator, 4 — wzmacniacz końcowy, 5 — manometr, 6 — generator podstawy czasu, 7 — oscyloskop, 8 — licznik impulsów

Coulter Electronics Ltd. (Wielka Brytania) i firma Coultronics France S.A. (Francja). Znanych jest ponad 1000 publikacji dotyczących konduktometrycznej metody analizy mikroobiektyw. Z tego około 25% dotyczy mikroobiektyw przemysłowych, pozostałe — biologicznych i biochemicznych.

W przemyśle za pomocą metody kontrastu elektrycznego przeprowadza się m.in.:

— analizę wymiarów proszków i zawiesin stałych, ciekłych i gazowych w cieczach (wodzie, paliwach, olejach),

— analizę wymiarów zanieczyszczeń powietrza i innych gazów roboczych,

— badanie dynamiki rozpuszczania się, krystalizacji i koagulacji cząstek w cieczy oraz innych procesów,

— kontrolę pracy filtrów, cyklonów, emulgatorów i innych urządzeń wymagających zastosowania analizy wymiarów mikroobiektyw.

Metoda kontrastu elektrycznego jest w szerokim zakresie stosowana w różnych gałęziach przemysłu do kontroli składu cząsteczkowego i czystości składników produktów pośrednich i końcowych (w przemyśle: spożywczym, chemicznym, ceramicznym, materiałów ściernych, metalurgii proszków, jądrowym, naftowym, tekstylnym, papierniczym, farmaceutycznym itd.).

Pierwsze urządzenia z czujnikiem konduktometrycznym wyprodukowane przez firmę Coulter Electronics Inc. (USA) pojawiły się na rynku w 1956 r. Od 1958 r. seryjną produkcję analizatorów konduktometrycznych rozpoczyna też firma AB Lars Ljungberg and Co (Szwecja). Firma ta wypuściła do tej pory na rynek Celloscope 101 i 401 z przeznaczeniem dla medycyny oraz Celloscope 202 i 302 dla przemysłu. Seryjną produkcję przyrządów z czujnikiem konduktometrycznym podjęto w ZSRR, NRD (w 1962 r. przyrząd typu CG1 i w 1968 r. — typu CG2), na Węgrzech (w 1965 r. przyrząd typu Mikrosceł i w 1967 — typu Pikosceł). Prace nad własnymi konstrukcjami tych przyrządów prowadzi się również w Jugosławii, Rumunii, Polsce, Holandii i Japonii.

5.6.2. Zasada kontrastu elektrycznego

Model uproszczony. W celu wyjaśnienia zasady kontrastu elektrycznego rozpatrzono przepływ cylindrycznej cząstki wzdłuż cylindrycznego otworu (kanału) wypełnionego elektrolitem, jak to pokazano na rys. 5.39.

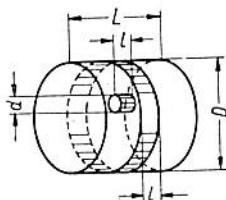
Zakładając, że: strumień prądu w cylindrycznym kanale jest stały, pole elektryczne podczas nieobecności zanieczyszczeń jest

równomierne oraz oś przechodzącej cząstki jest równoległa do osi kanału, obliczymy opór elektryczny elektrolitu znajdującego się w kanale o średnicy D i długości L , bez cząstki

$$R = \varrho_1 \frac{4L}{\pi D^2} \quad (5.25)$$

opór elektryczny wydzielonego elementu elektrolitu w kształcie walca o średnicy D i długości ad , bez cząstki

$$R' = \varrho_1 \frac{4ad}{\pi D^2} \quad (5.26)$$



Rys. 5.39. Przepływ cylindrycznej cząstki wzdłuż cylindrycznego kanału

opór elektryczny cylindrycznej cząstki o długości ad i średnicy bd

$$r_2 = \varrho_2 \frac{4ad}{\pi b^2 d^2} \quad (5.27)$$

opór elektryczny wydzielonego elementu elektrolitu, gdy znajduje się w nim cząstka (tzn. liczony bez cząstki)

$$r_1 = \varrho_1 \frac{4ad}{\pi (D^2 - b^2 d^2)} \quad (5.28)$$

oraz opór elektryczny wydzielonego elementu elektrolitu, gdy znajduje się w nim cząstka (tzn. liczony wraz z cząstką), składa się z dwóch równoległe połączonych oporów r_1 i r_2

$$R'' = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}} = \frac{1}{\frac{1}{\varrho_1 \frac{4ad}{\pi (D^2 - b^2 d^2)}} + \frac{1}{\varrho_2 \frac{4ad}{\pi b^2 d^2}}} \quad (5.29)$$

gdzie: ϱ_1 — opór elektryczny właściwy elektrolitu, ϱ_2 — opór elektryczny właściwy cząstki, a — współczynnik długości cząstki cylindrycznej, b — współczynnik średnicy cząstki cylindrycznej, d — średnica kuli, której objętość równa się objętości cylindra o długości ad i średnicy podstawy bd .

Zmiana oporu elektrycznego układu wskutek obecności w nim cząstki cylindrycznej o średnicy bd i długości ad wynosi zatem

$$\Delta R = R'' - R' = \frac{4\varrho_1 a}{\pi D^4} \frac{\left(1 - \frac{\varrho_1}{\varrho_2}\right) d^3}{\frac{1}{b^2} - \frac{d^2}{D^2} \left(1 - \frac{\varrho_1}{\varrho_2}\right)} \quad (5.30)$$

Współczynniki a , b oblicza się z zależności dla kulistych cząstek o równych objętościach

$$\frac{\pi d^3}{6} = \frac{\pi a b^2 d^3}{4} \quad (5.31)$$

stąd

$$1,5a = \frac{1}{b^2} \quad (5.32)$$

Podstawiając (5.31) do (5.30) otrzymamy

$$\Delta R = \frac{4\varrho_1}{\pi D^4} \frac{d^3}{\frac{1,5}{1 - \frac{\varrho_1}{\varrho_2}} - \frac{d}{aD^2}} \quad (5.33)$$

Wzór (5.33) można przedstawić też w innej postaci

$$\Delta R = \frac{\varrho_1 h s}{s^2} \frac{1 - \frac{\varrho_1}{\varrho_2}}{S - s \left(1 - \frac{\varrho_1}{\varrho_2}\right)} = \frac{\varrho_1 h s}{S} \frac{1}{\frac{1}{1 - \frac{\varrho_1}{\varrho_2}} - \frac{s}{S}} \quad (5.34)$$

gdzie: h — długość cząstki w kierunku równoległym do osi kanału; $h = ad$, s — pole przekroju cząstki ($s = \pi b^2 d^2 / 4$), S — pole przekroju elementu walcowego elektrolitu, ($S = \pi D^2 / 4$), hs — objętość cząstki, $hs = v_p$.

Zmiana oporu $\Delta R = 0$, gdy:

- 1) $d = 0$ lub $D = \infty$,
- 2) $\varrho_1 = 0$ lub $\varrho_1 = \varrho_2$.

Jeżeli cząstka całkowicie zapełnia kanał, tzn. dla $bd = D$ z równania (5.31) $d = \sqrt{1,5 a D}$, wówczas

$$\Delta R = \frac{4a \sqrt{1,5 a}}{D} (\varrho_2 - \varrho_1) \quad (5.35)$$

Przy założeniu $d \ll D$ (zazwyczaj przyjmuje się $b^2 d^2 \leq 10\% D^2$)

$$\Delta R = \frac{4\varrho_1}{D^4} \frac{1 - \frac{\varrho_1}{\varrho_2}}{1,5} d^3 \quad (5.36)$$

oraz przyjmując dodatkowo $\varrho_1 \ll \varrho_2$ otrzymamy wzór uproszczony

$$\Delta R = \frac{4\varrho_1 d^3}{1,5\pi D^4} = \frac{\varrho_1 v_p}{S^2} \quad (5.37)$$

gdzie objętość cząstki $v_p = \pi b^2 a d^3 / 4$, natomiast $S = \pi D^2 / 4$ oraz $1,5ab^2 = 1$.

Maksymalna zmiana oporu $\Delta R = \max$ wystąpi przy $\varrho_1 = \varrho_2 / 2$.

Model rzeczywisty. Założenia poczynione w punkcie poprzednim upraszczają opis zjawiska i dlatego wprowadzone wzory mają bardzo ograniczone zastosowanie. Badania f-my amerykańskiej Coulter Electronics doprowadziły do zmodyfikowania wzoru (5.37), przez co stał się on bardziej uniwersalny

$$\Delta R = \frac{\varrho_1 v_p}{S^2} \frac{1}{\frac{1}{1 - \frac{\varrho_1}{\varrho_2}} - \frac{s}{XS}} = R \frac{v_p}{V_{otw}} \frac{1}{\frac{1}{1 - \frac{\varrho_1}{\varrho_2}} - \frac{s}{XS}} \quad (5.38)$$

gdzie: X — współczynnik kulistości, $X = h/d$, h — długość cząstki w kierunku równoległym do osi kanału, d — średnica zastępcza cząstki kulistej odpowiadająca cząstce rzeczywistej, V_{otw} — objętość kanału o średnicy D i długości L .

Współczynnik kulistości X ustalono w wyniku doświadczeń; wzór (5.38) też określa zjawisko z dużym przybliżeniem. Próby określenia współczynnika X z zastosowaniem metody analitycznej nie zapewniły zwiększenia dokładności, gdyż zakładano jednorodność pola elektrycznego w otworze.

Teoretyczny wzór *Realeigha* uwzględnia orientację cząstki w kanale i „skażenie” (zakłócenie jednorodności) pola elektrycznego podczas obecności cząstki w kanale

$$\Delta R = z \frac{4\varrho_1 \left(1 - \frac{\varrho_1}{\varrho_2}\right)}{1,5 \pi D^4} d^3 \quad (5.39)$$

przy czym z jest współczynnikiem pola elektrycznego i funkcją trzech wielkości: współczynnika kształtu i orientacji cząstki f , wzajemnego stosunku względnego oporu fazy dyspersyjnej ϱ_1 i fazy rozproszonej ϱ_2 , objętościowej koncentracji fazy rozproszonej p .

W przypadku, gdy koncentracja fazy zdyspergowanej jest bardzo mała ($k \ll 1$), F.M. Rabinowicz ustalił analitycznie funkcję $z = F(f, \varrho_1, \varrho_2, k)$, jako

$$z = \frac{f \left(1 - \frac{\varrho_1}{\varrho_2} \right)}{1 + \frac{\varrho_1}{\varrho_2} (f - 1)} \quad (5.40)$$

spełniającą warunek $\varrho_1 \ll \varrho_2$, $z = f$, przy czym f jest określane stosunkiem wzajemnym długości trzech osi cząstek. Kształt cząstek ma tu znacznie mniejsze znaczenie. W przypadku cząstek o stosunku długości ich osi równym 1 : 1 : 1, wielkość współczynnika f nie zależy w praktyce od orientacji cząstek. Średnia wartość współczynnika f uzyskana w wyniku doświadczeń w przypadku cząstek o różnym kształcie jest zgodna z teoretycznymi obliczeniami Velicka i Gorina przy takim samym stosunku osi.

W tabl. 5.5 podano wartości współczynników f w zależności od kształtu i orientacji cząstek, a w tabl. 5.6 porównano wartości współczynnika f uzyskane doświadczalnie i teoretycznie. W tabl. 5.7 przedstawiono wyniki doświadczenia, w którym użyto czterech kul o średnicach 8,5; 11,0; 12,5 i 14,0 cm. Określano wartość współczynnika f w wannie elektrolitycznej przy zachowaniu odległości między elektrodami $l_1 = 20$ cm (objętość sześcianu), a następnie doświadczenie powtórzono przy elektrodach rozsuniętych na odległość $l_2 = 60$ cm (objętość prostopadłościanu). W objętości sześcianu mimo, iż koncentracja objętościowa p dla trzech kul przekracza wartość dopuszczalną 6,5%, współczynnik f jest praktycznie dla wszystkich kul stały i równy teoretycznemu. W objętości prostopadłościanu przy mniejszej koncentracji objętościowej kul wartość współczynnika f znacznie różni się od współczynnika określonego teoretycznie.

Zjawisko to tłumaczy się w sposób następujący. W pierwszym przypadku zakłócenie jednorodności pola w pobliżu elektrod jest kompensowane przez zakłócenia w pobliżu ścian wanny i powierzchni elektrolitu. W drugim przypadku kompensacja nie zachodzi, ponieważ elektrody są rozsunięte i pole w ich pobliżu nie ulega zakłóceniom. Przewodność elektryczna układu niejednorodnego podczas jego ruchu zwiększa się. Zjawisko to zostało odkryte przy badaniu krwi. Najbardziej przekonująca interpretacja powyższego zjawiska wyjaśnia zwiększanie przewodności elektrycznej układu niejednorodnego przy jego ruchu uporządkowaniem orientacji cząstek i ich koncentracją przyosiową. Nagły wzrost gęstości prądu przed wejściem do kanału warunkuje początek zmiany oporu elektrycznego już wtedy, gdy cząstka znajduje się w objętości

Tablica 5.5. Porównanie współczynnika f dla cząstek różnych kształtów

Stosunek długości osi	Kształt	Najdłuższa oś równoległa do linii sił pola		Najdłuższa oś prostopadła do linii sił pola	
		f	wartość średnia f	f	wartość średnia f
1 : 1 : 1	kula	1,48	1,52	1,48	1,52
	walec	1,53		1,55	
	sześcian	1,57		1,57	
1,5 : 1 : 1	walec	1,39	1,38	1,77	1,76
	równoległoscian	1,37		1,74	
1,5 : 1,5 : 1	krążek	1,39	1,36	1,74	1,80
	równoległoscian	1,35		1,87	
	ścięta kula	1,35		1,76	
2 : 2 : 1	krążek	1,37	1,31	2,12	2,11
	równoległoscian	1,28		2,11	
	ścięta kula	1,30		2,30	
	elipsoida	1,30		1,92	
3 : 3 : 1	równoległoscian	1,23	1,26	2,56	2,81
	ścięta kula	1,22		3,06	
	elipsoida	1,35		2,83	
4 : 4 : 1	krążek	1,13	1,14	2,92	3,21
	ścięta kula	1,15		3,51	

Tablica 5.6. Porównanie wartości współczynnika kształtu f uzyskanych teoretycznie i doświadczalnie [94]

Stosunek długości osi	Najdłuższa oś równoległa od linii sił pola			Najdłuższa oś prostopadła od linii sił pola		
	wartość teoretyczna	wartość doświadczalna	odchylenie %	wartość teoretyczna	wartość doświadczalna	odchylenie %
1 : 1 : 1	1,50	1,52	$\pm 0,7$	1,50	1,52	$\pm 0,7$
2 : 2 : 1	1,31	1,31	0	2,15	2,11	$\pm 0,9$
3 : 3 : 1	1,22	1,26	$\pm 1,6$	2,71	2,81	$\pm 1,8$
4 : 4 : 1	1,17	1,14	$\pm 1,3$	3,36	3,21	$\pm 2,3$

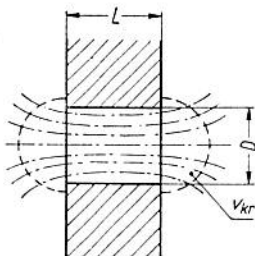
Tablica 5.7. Zależność współczynnika f od koncentracji objętościowej fazy rozpraszanej p [94]

Średnica kuli cm	Objętość kuli cm ³	$l_1 = 20$ cm		$l_2 = 60$ cm	
		p %	f	p %	f
8,5	320	4,0	1,57	1,3	1,53
11,0	710	8,9	1,55	3,7	1,60
12,5	1010	12,6	1,55	4,2	1,70
14,0	1440	18,0	1,58	6,0	1,85

$p = \frac{v_p}{v_o}$ gdzie: v_p – objętość cząstki,
 v_o – objętość otworu.

krytycznej V_{kr} (rys. 5.40). Według „Matterne Determination of number and size of particles by electrical gating blood cells” objętość krytyczna wynosi w przypadku czujnika z otworem o średnicy 100 μm i długości 75 μm

$$V_{kr} = 3V_{otw} = \frac{3}{4} L\pi D^2 \quad (5.41)$$



Rys. 5.40. Linie gęstości prądu w obszarze kanału. Objętość krytyczna

Vachtel i La Mer, powołując się na nowe dane firmy Coulter Electronics, wykazują, że $V_{kr} = 2,5 V_{otw}$.

5.6.3. Formowanie impulsu napięciowego

Amplituda impulsu. Czujnik włącza się do obwodu wejściowego wzmacniacza. Na rys. 5.38 przedstawiono schemat obwodu wejściowego wzmacniacza (blok 1).

Prąd w obwodzie czujnika podczas nieobecności cząstki w kanale

$$I_0 = \frac{U - E_p}{R_{obc} + R_{cz}} \quad (5.42)$$

a w tym czasie potencjał punktu A

$$\varphi_A = I_0 R_{cz} + E_p = \frac{U - E_p}{R_{obc} + R_{cz}} R_{cz} + E_p \quad (5.43)$$

oraz potencjał punktu A, gdy w kanale znajduje się cząstka

$$\varphi'_A = \frac{(U - E'_p)(R_{cz} + \Delta R)}{R_{obc} + R_{cz} + \Delta R} + E'_p \quad (5.44)$$

gdzie: U — stałe napięcie przyłożone do obwodu czujnika, E_p — siła elektromotoryczna polaryzacji, R_{obc} — opór elektryczny obciążenia, R_{cz} — opór elektryczny czujnika.

Przyjmuje się $E_p \approx E'_p$.

Amplituda skoku potencjału w punkcie A po pojawieniu się w otworze cząstki

$$U_c = (U - E_p) \frac{R_{obc} \Delta R}{(R_{obc} + R_{cz} + \Delta R)(R_{obc} + R_{cz})} \quad (5.45)$$

lub

$$U_c = I_0 \frac{R_{obc} \Delta R}{R_{obc} + R_{cz} + \Delta R} \quad (5.46)$$

Zazwyczaj $\Delta R \ll R_{obc} + R_{cz}$ i dlatego

$$U_c = I_0 \frac{R_{obc}}{R_{obc} + R} \Delta R \quad (5.47)$$

a oznaczając $R_{cz}/R_{obc} = \nu$, otrzymamy

$$U_c = I_c \frac{1}{1 + \nu} \Delta R \quad (5.48)$$

Podstawiając na ΔR teoretyczny wzór Rayleigha (5.39) otrzymamy

$$U_c = I_0 \frac{4\rho_1 \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right) z}{1,5\pi D^4 (1 + \nu)} d^3 \quad (5.49)$$

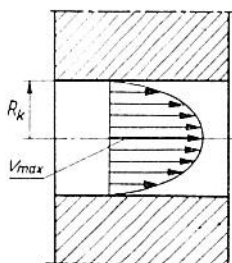
a ponieważ objętość cząstki $v_p = \frac{\pi d^3}{6}$, więc

$$U_c = I_0 \frac{24\rho_1 \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right) z}{1,5\pi^2 D^4 (1 + \nu)} v_p \quad (5.50)$$

zatem na ogół

$$U_c = I_0 \frac{24\rho_1 f}{1,5\pi^2 D^4 (1 + \nu)} v_p \quad (5.51)$$

Długość impulsu. Długość impulsu jest określana czasem przejścia cząstki przez objętość krytyczną. Rozkład prędkości przy prze-



Rys. 5.41. Rozkład prędkości wzdłuż średnicy kanału przy przepływie laminarnym

plywie laminarnym w kanale pokazano na rys. 5.41. Prędkość maksymalna występuje wzdłuż osi kanału i wynosi

$$V_{max} = \frac{\Delta p R_k^2}{4L\mu} \quad (5.52)$$

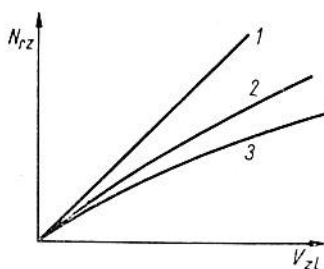
gdzie: Δp — spadek ciśnienia w kanale, R_k — promień kanału, L — długość kanału, μ — współczynnik lepkości środowiska

Czas przejścia cząstki przez kanał jest określony spadkiem ciśnienia w kanale.

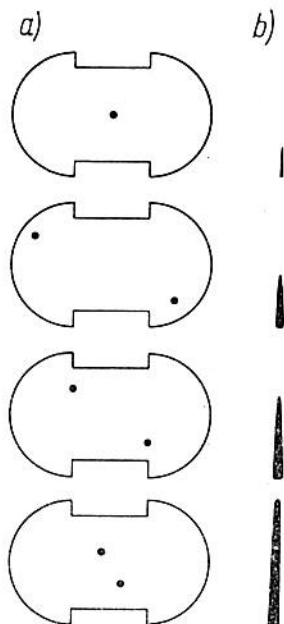
5.6.4. Błędy pomiaru

Błąd koincydencji. Błąd ten jest spowodowany obecnością w tym samym czasie w objętości kanału więcej niż jednej cząstki. Błąd koincydencji powoduje:

- zniżenie odczytu rzeczywistej liczby cząstek (rys. 5.42),
- zniżenie odczytu rzeczywistej objętości cząstek (rys. 5.43).



Rys. 5.42. Wykres zależności zliczania N_{zl} cząstek metodą kontrastu elektrycznego od wyniku rzeczywistego N_{rz} ; 1 — zależność teoretyczna, 2 — krzywa doświadczalna dla kanału o średnicy D_1 , 3 — krzywa doświadczalna dla kanału o średnicy $D_2 > D_1$



Rys. 5.43. Błąd koincydencji: a) położenie cząstek w objętości krytycznej V_{kr} , b) odpowiadające położenie cząstek w objętości krytycznej, impulsy na wyjściu licznika

Posługując się rozkładem Poissona znajdujemy prawdopodobieństwo W_n , że oczekiwana liczba cząstek n z liczby cząstek m znajduje się w elemencie objętości dV , przy czym liczba cząstek

m w liczbie elementów objętości k jest rozłożona statystycznie, a więc

$$W_n = \frac{M_n}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (5.53)$$

przy czym ilość zdarzeń sprzyjających

$$M_n = \frac{m}{n} (k-1)^{m-n} \quad (5.54)$$

a suma wszystkich zdarzeń

$$\sum_{i=1}^n M_i = k^m \quad (5.55)$$

Zatem

$$W_n = \frac{m}{n} k^{-n} \left(1 - \frac{1}{k}\right)^{m-n} \quad (5.56)$$

a przy dużej liczbie cząstek m , co odpowiada rzeczywistym warunkom

$$W_n = \frac{m^n}{n!} e^{-m} \quad (5.57)$$

przy czym m jest średnią liczbą cząstek

$$\bar{m} = \frac{m}{k} \quad (5.58)$$

Z równania (5.54) można określić, mając zadany błąd dopuszczalny, wymiary kanału lub stopień rozcieńczenia badanego ośrodka. Istnieje również następująca zależność między wymiarami kanału a błędem koincydencji δ wg Pfeiffera

$$\delta = \frac{3LD^2}{8k_p} C_c \cdot 10^{-7} \% \quad (5.59)$$

gdzie: L — długość kanału w μm , D — średnica kanału w μm , k_p — stopień rozcieńczenia, C_c — wyjściowa koncentracja cząstek w 1 mm^3 .

Firma Lars Ljungberg podaje następującą zależność ustaloną w wyniku doświadczeń dla produkowanych przez nią czujników

$$\delta = 6D^2c \cdot 10^{-9} \% \quad (5.60)$$

gdzie: D — w μm , c — koncentracja cząstek w 1 ml .

Błąd koincydencji należy do grupy błędów systematycznych i po przeprowadzeniu jego analizy może być skompensowany. Na

przykład szwedzka firma AB Lars Ljungberg and Co. koryguje otrzymany wynik n wg wyrażenia

$$N = \frac{n}{1 - kn} \quad (5.61)$$

gdzie: N — skorygowana liczba cząstek, n — liczba cząstek podana przez analizator, k — współczynnik zależny od średnicy otworu (tabl. 5.8).

Tablica 5.8. Dobór współczynnika k korekcji błędu koincydencji w zależności od średnicy otworu

Średnica otworu μm	k	Średnica otworu μm	k	Średnica otworu μm	k
30	$8 \cdot 10^{-8}$	100	$16 \cdot 10^{-7}$	190	$11 \cdot 10^{-6}$
48	$22 \cdot 10^{-8}$	120	$25 \cdot 10^{-7}$	300	$36 \cdot 10^{-6}$
76	$5 \cdot 10^{-7}$	150	$46 \cdot 10^{-7}$	400	$80 \cdot 10^{-6}$

Wales i Wilson w swych pracach podają, że $k = \frac{1}{2} \frac{V_{kr}}{D}$, przy czym V_{kr}/D jest nazywana dawką przyrządu (zakres czujnika).

Błąd spowodowany zaniedbaniem ΔR w mianowniku wyrażenia na U_c . Błąd ten wynosi

$$U_c = \frac{\Delta R}{R_{obc} + R_{cz}} = \frac{4 \varrho_1 \left(1 - \frac{\varrho_1}{\varrho_2}\right) d^3}{1,5 D^4 (R_{obc} + R_{cz})} \quad (5.62)$$

Błąd ten nie przekracza dziesiątych części procentu, a więc można go pominąć.

Błąd temperaturowy. Błąd ten jest spowodowany zależnością oporu właściwego elektrolitu od jego temperatury

$$\varrho_0 = \frac{1}{\alpha(u+v)} \quad (5.63)$$

gdzie: α — stopień dysocjacji, u, v — ruchliwość kationów i anionów.

Wielkości u, v zależą od temperatury.

W ogólnym przypadku przy słabej koncentracji zależność oporu elektrycznego elektrolitu od temperatury wyraża się następującym wzorem

$$R(t) = \frac{R_0}{1 + \beta(t - t_0)} \quad (5.64)$$

gdzie: R_0 — opór elektryczny elektrolitu w temperaturze t_0 °C, β — współczynnik temperaturowy oporu ($\beta \approx 0,016$ 1/°C dla kwasów, $\beta \approx 0,024$ 1/°C dla soli).

Błąd względny spowodowany zależnością oporu elektrycznego właściwego od temperatury wynosi

$$\delta_{uc} = \frac{R_{obc}}{R_{obc} + R_{cz}} \left(1 - \frac{2Q_1}{Q_2} \right) \quad (5.65)$$

$\delta_{uc} = \delta_{uc \text{ min}}$ przy $R_{obc} = R_{cz}$.

Błąd temperaturowy względny przekracza niekiedy 10% i ma największy wpływ na wynik analizy.

Błąd spowodowany sedymentacją cząstek. W celu zmniejszenia wpływu tego błędu zaleca się rozpoczęcie analizy wkrótce po przygotowaniu elektrolitu. Zaleca się również mieszanie badanej cieczy.

Błąd spowodowany przedostaniem się do zawiesiny zanieczyszczeń z zewnątrz (np. kurzu, zanieczyszczeń z rozpuszczalnika lub zanieczyszczeń powstałych jako produkt elektrolizy). Rozpuszczalnik ponadto może powodować tzw. puchnięcie zanieczyszczeń. Błąd ten możemy wyregulować dobierając odpowiedni rozpuszczalnik. W celu zmniejszenia wpływu produktów elektrolizy należy obwód czujnika zasilac prądem zmiennym. Najczęściej stosuje się częstotliwość 10^5 Hz.

Błąd koncentracji. Błąd ten wynika z rozbieżności między koncentracją elektrolitu w roztworach kalibrującym a roboczym powstałą w wyniku np. elektrolizy, czy niedokładnego przygotowania. Badania wykazały, że dla dwóch koncentracji chlorku sodu NaCl, wynoszących 0,85 i 0,95%, rozbieżność stanowiła 12,5%. Wielkość błędu koncentracji δ_k może być znacznie zmniejszona przez dokonanie racjonalnego wyboru stosunku R_{obc} do R_{cz} .

Błąd nieuwzględnienia kształtu i orientacji cząstki. Według Rabinowicza błąd ten (dla cylindrycznych i długich otworów) wynosi

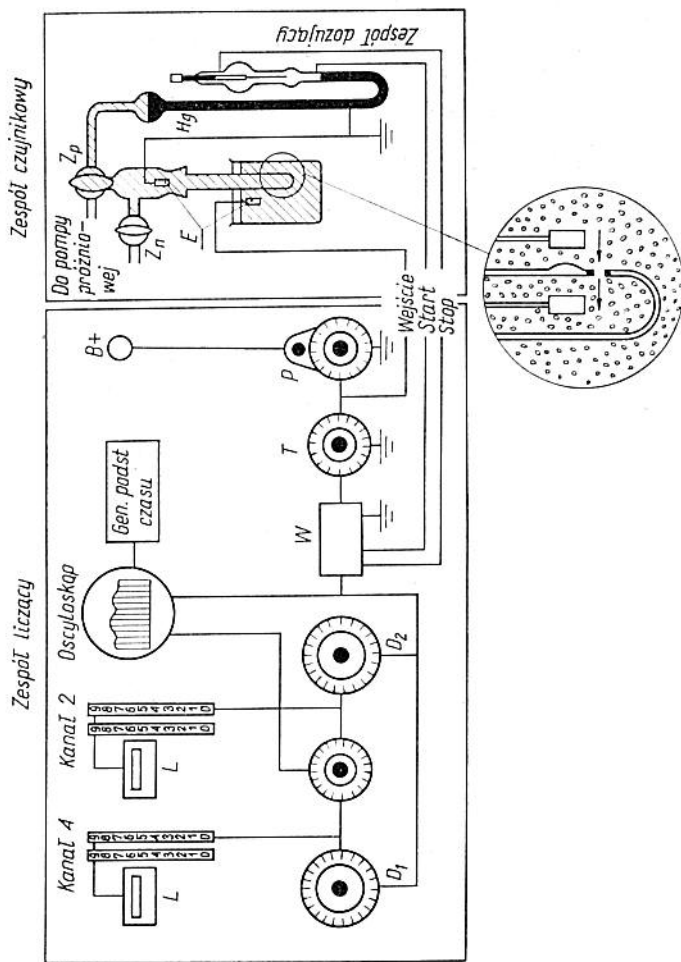
$$\delta_f = \frac{1,5 - f}{1,5} \cdot 100 \quad (5.66)$$

gdzie f — współczynnik kształtu i orientacji cząstki.

Błąd ten przy stosunku osi 1,5 : 1,5 : 1 wynosi 95%, przy stosunku osi 2 : 1 : 1 — 19,3%, a przy stosunku osi 5 : 5 : 1 — 24%.

5.6.5. Budowa analizatorów

Zasada działania jest taka sama we wszystkich produkowanych do tej pory analizatorach. Dlatego omówione będzie działanie tylko jednego analizatora typu Celloscope 302 produkowanego przez firmę AB Lars Ljungberg. Schemat analizatora przedstawiono na rys. 5.44.



Rys. 5.44. Schemat budowy i działania licznika Celloscope 302; T — tłumik, Z — zawór do napełniania

Odpowiednio rozcieńczoną w elektrolicie zawieszinę przepuszcza się przez otwór łączący dwa izolowane naczynia (patrz powyższy fragment rysunku). Pod wpływem źródła prądu między elektrodami E zanurzonymi w cieczy płynie prąd. Wielkość prądu jest ustalona oporem elektrycznym substancji znajdującej się wewnątrz otworu (patrz p. 5.6.2.). Jeżeli we wnętrzu otworu znajdzie się cząstka, opór elektryczny całkowity wzrośnie. Na oporniku (opór obciążenia R_{obc} nastawiany potencjometrem P) powstaje impuls napędowy o amplitudzie proporcjonalnej do objętości cząstki. Impulsy są wzmacniane przez wzmacniacz W i przekazywane przez dyskryminator (D_1 i D_2) na licznik L . W celu otrzymania krzywej rozkładu wymiarów cząstek zmienia się kolejno ustawienia dyskryminatorów.

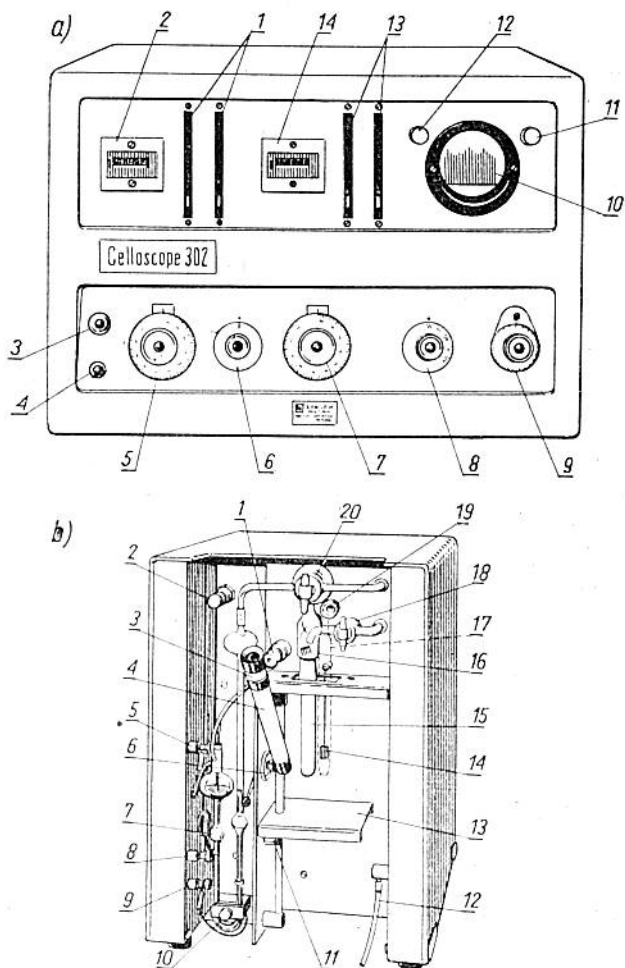
Ustalenie objętości zawiesziny, w której określa się liczbę cząstek, realizuje się za pomocą pompy próżniowej, manometru rtęciowego (U — rurka) oraz dwóch styków „start” i „stop”. Przy otwartym zaworze Z_p łączącym układ mierzący z pompą próżniową, pompa „podciąga” rtęć, aż w prawym ramieniu rurki poziom rtęci będzie nieco poniżej styku (elektrody) „start”. Po zamknięciu zaworu Z_p rtęć wraca do pierwotnego położenia, zapewniając przy tym stały przepływ elektrolitu przez otwór łączący dwa izolowane naczynia. Urządzenie liczące zaczyna liczyć, gdy rtęć zamyka styk „start”, a przerywa pracę, gdy rtęć zamyka styk „stop”.

W celu omówienia budowy analizatora również posłużymy się analizatorem Celloscope 302 przedstawionym na rys. 5.45. Dwa zasadnicze zespoły, tj. liczący i czujnikowy, z których składa się przyrząd, mogą być ze sobą połączone na stałe lub stanowić dwa odrębne aparaty.

Z e s p ó ł c z u j n i k o w y obejmuje czujnik i układ hydrauliczny.

Głównymi częściami czujnika są: naczynie (rurka „ślepa”) z mikrootworem oraz dwie elektrody, z których jedna znajduje się wewnątrz, a druga na zewnątrz naczynia. Całość podczas pracy jest umieszczona w elektrolicie wypełniającym zlewkę. Kształt otworu przy liczeniu cząstek nie ma znaczenia. Natomiast przy określaniu wymiarów cząstek kształt otworu powinien być cylindryczny (otwór szklanego czujnika Celloscope ma kształt ściętego stożka).

Średnicę otworu dobiera się w zależności od średniej średnicy badanych cząstek i dopuszczalnego błędu przy określeniu parametrów rozkładu. Górny zakres pomiarowy czujnika jest ograniczony zatykaniem się otworu przez największe cząstki. Zbadano, że prawdopodobieństwo zatkania gwałtownie wzrasta, gdy średnia średnica cząstek przekracza połowę średnicy otworu. Dolny zakres



Rys. 5.45. Budowa licznika Celloscope 302: a) zespół liczący; 1 — licznik kanału I ze wskazaniem neonowym, 2 — mechaniczny licznik kanału I z kasownikiem, 3 — światło sygnalizacyjne, 4 — włącznik-wyłącznik, 5 — poziom D_1 kanału I, 6 — przełącznik oscyloskopu, 7 — poziom D_2 kanału II, 8 — tłumik T, 9 — potencjometr P, 10 — oscyloskop, 11 — nastawnik ostrości, 12 — nastawnik jasności, 13 — licznik kanału II ze wskazaniem neonowym, 14 — mechaniczny licznik kanału II; b) zespół czujnikowy; 1 — urządzenie mikroskopu, 2 — nastawnik próżni, 3 — nastawnik ostrości, 4 — mikroskop, 5 — zaciskowa elektroda „stop”, 6 — zamek mikroskopu, 7 — zespół mierzący, 8 — zaciskowa elektroda „start”, 9 — zaciskowa elektroda uziemiająca, 10 — belka wspornikowa, 11 — zamocowanie platformy, 12 — rurka do napełniania, 13 — stolik, 14 — elektroda zewnętrzna, 15 — naczynie z mikrootworem, 16 — elektroda wewnętrzna, 17 — dysza miesząda, 18 — zawór do napełnienia, 19 — oprawka miesząda, 20 — zawór do pompy

pomiarowy jest ograniczony poziomem szumów czujnika, a zakres pomiarowy średnicy cząstek pierwszego czujnika zawiera się w obszarze od ok. 2% do 40% średnicy otworu. Dokładna analiza może być również przeprowadzona, jeśli średnice cząstek zawierają się w zakresie 2÷25% średnicy otworu.

Cząstki mogą być określane dokładnie jedynie wtedy, gdy otwór jest całkowicie wolny od wszelkich czynników mogących hamować przepływ strumienia. Z tego powodu zaleca się sprawdzanie otworu pod mikroskopem, zamontowanym najczęściej w układzie czujnikowym podczas liczenia. Minimalna średnica otworu, o której są wzmianki w literaturze, wynosi 10 μm . Czujnik z takim otworem mierzy cząstki o średnicy 0,3 μm . Maksymalna średnica otworu wynosi 2 mm. Otwór taki umożliwia zmierzenie cząstek o średnicy 800 μm . W licznikach Coultera stosunek długości otworu do jego średnicy $L/D = 0,75$. Długi otwór powoduje zwiększenie błędu koincydencji, poziomu szumów czujnika oraz prawdopodobieństwa zatkania otworu.

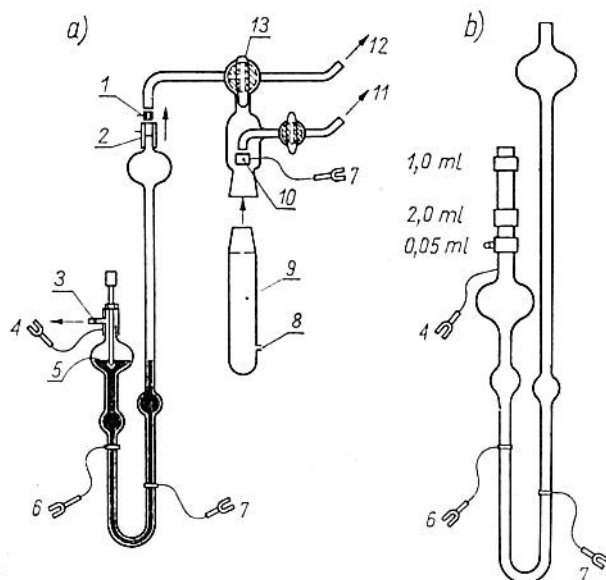
Najprostsza metoda wykonania mikrootworu polega na wyciągnięciu nagrzonej szklanej ścianki czujnika w kształcie brodawki, którą następnie zeszlifowuje się aż do uzyskaniażądanego wymiaru. Metoda ta była już od dawna stosowana w przyrządzie Celloscope. Wadą tej metody była trudność uzyskaniażądanego kształtu, długości i średnicy. Firma Coulter Electronics Ltd. przyjęła technologię znacznie lepszą. Wyciągniętą szklaną kapilarę cięto na cienkie krążki, które następnie po oszlifowaniu otworu i powierzchni bocznych ustalono na ściankach czujników za pomocą kleju.

Obecnie stosuje się zamiast szklanego krążka — szafir (syntetyczny) z gotowym mikrootworem. Kamień z mikrootworem nie jest produkowany przez firmy wytwarzające liczniki, lecz sprowadzany ze Szwajcarii. Kamień nie przykleja się, lecz wtapia w szkło czujnika. Technologia ta jest stosowana w firmach Coulter Electronics i Lars Ljungberg. Czujniki takie mają mikrootwory o standardowej średnicy i kształcie i mogą pracować w aktywnym otoczeniu. Czyści się je kwasem chromowym.

Elektrody wykonuje się najczęściej z platyny. Przy zastosowaniu innych materiałów następuje elektrolityczne rozpuszczenie elektrod i zapchanie otworu cząstkami z ich powierzchni. Ponadto takie elektrody nie mogą pracować w środowisku aktywnym.

Układ hydrauliczny przedstawiony na rys. 5.46 składa się z zespołu dozującego, zespołu zaworów i pompy próżniowej. Zadaniem jego jest przeprowadzenie badanej zawiesiny przez mikrootwór czujnika, dozowanie zawiesiny oraz wydalenie przeanalizowanej zawiesiny z układu czujnikowego.

Zespół dozujący przeważnie stanowi szklana rurka w kształcie litery U napełniona rtęcią. Zaletami takiego układu hydraulicznego jest niezawodność, możliwość obserwacji (przezroczystość) i dokładność dozowania, natomiast główną wadą — obecność rtęci.



Rys. 5.46. Schemat układu hydraulicznego: a) z układem dozującym jednozakresowym, b) z układem dozującym trzyzakresowym; 1 — zwężka, 2 — rurka plastikowa, 3 — do urządzenia czyszczącego mikrootwór, 4 — zaciskowa elektroda „stop”, 5 — poziom rtęci, 6 — zaciskowa elektroda „start”, 7 — zaciskowa elektroda uziemiająca, 8 — mikrootwór, 9 — naczynie z mikrootworem, 10 — elektroda wewnętrzna, 11 — do rurki do napełniania, 12 — do butli próżniowej, 13 — zawór „do pompy”

Opracowano już kilka układów hydraulicznych bez rtęci. Bezrtęciowy układ z mieszkem opracowano w ZSRR, układ wtrys-kowy — w firmie Medikor (Węgry).

Zespół liczący składa się z podzespołów, którymi są: układ wzmacniający, dyskryminator, układ przeliczający, oscyloskop.

Układ wzmacniający zwiększa amplitudy impulsów czujnika z ok. $10 \div 100 \mu\text{V}$ na $1 \div 30 \text{ V}$, które stanowią amplitudę impulsów na wejściu dyskryminatora. Układ wzmacniający powinien mieć współczynnik wzmocnienia rzędu $10^3 \div 10^6$. Ponieważ stosunek górnych i dolnych amplitud napięcia czujnika przekracza 10^5 , należy stosować wzmacniacze nieliniowe, np. logarytmiczne. Liczba stopni

wzmacniacza zazwyczaj nie przekracza 3—4. W celu umożliwienia regulowania współczynnika wzmocnienia wstawia się w obwód tłumik. Umieszcza się go na wejściu wzmacniacza lub między stopniami.

Dyskryminator w zależności od przeznaczenia i klasy przyrządu może być rozwiązany w jeden z następujących sposobów:

— *jednokanałowy analizator całkowity* — zawiera jeden dyskryminator progowy; podobny schemat występuje w większości przyrządów seryjnych;

— *wielokanałowy analizator całkowity* — zawiera kilka dyskryminatorów progowych, po każdym z nich ustawia się oddzielny licznik; dwukanałowy analizator całkowity wykorzystuje się w przyrządach Celloscope 202 i Celloscope 302;

— *jednokanałowy analizator różniczkowy* (nazywany też *różnicowym* lub *szczelinowym*) — zawiera dwa dyskryminatory progowe, układ antykoincydencyjny (zapobiega powstawaniu zjawiska koincydencji) i jeden licznik; schemat taki ma model B licznika Coultera i niemieckie przyrządy CG1 i CG2;

— *wielokanałowy analizator różniczkowy* — zawiera kilka dyskryminatorów szczelinowych; model C licznika Coultera ma dwunastokanałowy analizator różniczkowy.

Do liczenia liczby impulsów w produkowanych seryjnie przyrządach wykorzystuje się układy przeliczające w postaci: liczników mechanicznych (model A i D licznika Coultera oraz wszystkie modele Celloscope'u), dekatronów (model B i F licznika Coultera CG1, SFEK-60), liczników ze wskaźnikiem neonowym (model FN licznika Coultera; CG2; Celloscope 202 i 302 oprócz dwóch liczników mechanicznych zawiera cztery liczniki ze wskaźnikiem neonowym).

5.6.6. Eksploatacja analizatorów z czujnikiem konduktometrycznym

Jedną z najważniejszych czynności eksploatacyjnych jest *wybór elektrolitu*. Od prawidłowego wyboru elektrolitu zależy w bardzo dużym stopniu wynik pomiarów. Elektrolit powinien mieć opór elektryczny właściwy zawarty w zakresie 5÷2000 Ω cm, a ponadto nie powinien oddziaływać na badane, rozproszone w nim cząstki, tzn. nie powinien ani rozpraszać, ani nie powodować ich „puchnięcia”.

Najbardziej uniwersalnym elektrolitem jest 0,9% roztwór NaCl mający opór elektryczny właściwy ok. 70 Ω cm przy 20°C. Jest on łatwo dostępny i może być użyty do badania różnorodnych cząstek. Dlatego mikrootwory Celloscope'u są kalibrowane dla tego elektrolitu. Jako czynniki dyspergujące stosuje się naj-

Tablica 5.9. Dobór elektrolitu i czynników dyspergujących dla różnych substancji

Elektrolit	Badana substancja	Czynnik dyspergujący
1% roztwór NaCl w wodzie	glin gips talk	izopropanol cytrynian potasu sześciometafosfat sodu
4% roztwór tiocyjanianu amonowego w izopropanolu	cynek ołów srebro krochmal szklany proszek grafit sól kamienna kreda	izopropanol etanol + sulfamid etanol — — — — izopropanol, czterochlorek węgla
1% roztwór NaCl w wodzie lub 4% roztwór tiocyjanianu amonowego w propanolu	dolomit	sześciometafosfat sodu
2 lub 5% roztwór formamidu + 4% roztwór tiocyjanianu wapnia w bezwodnym etanolu	cement	izopropanol
1,5% roztwór NaOH	lateks	
1,5% roztwór KCNS w acetonie	mangan	
1,5% roztwór NaNO ₃ w wodzie	tlenek srebra	
1% roztwór NH ₄ Cl w wodzie	siloksanwinylu	
2,4% roztwór NH ₄ CNS w metyloetyloketonie	pigmenty	
1% roztwór MgCl ₂ w bezwodnym etanolu	węgiel	
4% roztwór Na ₄ P ₂ O ₇ w wodzie	kaolin	
Źródło jonów — tiocyjanian wapnia lub amonu. Rozpuszczalniki — mieszaniny izopropanolu i dwumetyloformamidu, acetonu i trójchloroetyleny, izopropanolu i dwuchloroetyleny, acetonu i czterowodorofuranu. Stężenie substancji dobiera się do każdego konkretnego przypadku	—	—

Tablica 5.10. Receptury do przygotowania suspencji w celu zliczania cząstek przy użyciu licznika Coultera dla różnych olejów [8]

Oleje	Skład chemiczny	Uwagi
Avtur Avtag; Skydrol 500;	3 części alkoholu izopropylowego zawierającego rodatek amonowy NH_4CNS w składzie 5% wagowo: 1 część dwumetyloformamidu 2 części badanego oleju	
Ciecz hydrauliczna DP. 47	(I) 3 części acetonu zawierającego wagowo: 1,5% rodanku potasu KCNS 2 części trójchloroetylenu 1 część badanego oleju	można zastąpić trójchloroetylen dwuchloroetylenem, aby mieć większą przewodność elektryczną, ale to odbywa się kosztem stabilności
	(II) 3 części alkoholu izopropylowego zawierającego wagowo: 5% rodanku amonowego NH_4CNS 3 części dwuchloroetylenu 1 część badanego oleju	można zastąpić dwuchloroetylen trójchloroetylenem, ale zmniejszy się przewodność elektryczna (może nie być efektów mierzalnych)
	(III) 6 części alkoholu izopropylowego zawierającego wagowo: 5% rodanku amonowego NH_4CNS 5 części dwuchloroetylenu 2 części badanego oleju	można zastąpić dwuchloroetylen trójchloroetylenem, ale powoduje to zmniejszenie przewodności elektrycznej
Ciecz hydrauliczna RD.6.195	(I) 3 części acetonu zawierającego wagowo: 1,5% rodanku potasu KCNS 1 część trójchloroetylenu 1 część badanego oleju	wszystkie składniki muszą być suche, aby uniemożliwić hydrolizę oleju; można zastąpić trójchloroetylen dwuchloroetylenem, aby mieć wyższą przewodność elektryczną, ale ze zmniejszeniem stabilności
	(II) 6 części acetonu zawierającego wagowo 1,5% rodanku potasu KCNS 3 części nitrobenzenu 2 części badanego oleju	wszystkie składniki muszą być suche, aby uniemożliwić hydrolizę oleju; ten skład jest lepszy, uzasadniony technicznie, ponieważ ma lepszą przewodność; jego wadą jest toksyczność nitrobenzenu
	(III) 3 części acetonu zawierającego wagowo: 1,5% rodanku potasu KCNS 1 część czterochydrofuranu 2 części badanego oleju	wszystkie składniki muszą być suche, aby uniemożliwić hydrolizę oleju; ten skład chemiczny daje wyniki pośrednie między dwoma powyższymi, ale ilość czterochydrofuranu jest bardzo bliska minimum niezbędnego do rozpuszczenia oleju
	(IV) 3 części alkoholu izopropylowego zawierającego wagowo 5% rodanku NH_4CNS 1 część dwumetyloformamidu 1 część badanego oleju	

częściej: izopropanol, dwumetyloformamid, etanol, metyloetyloketon, aceton, trójchlorek etylu, chloroform, metanol i inne. W tabl. 5.9 podano zestawy elektrolitów i czynników dyspergujących dla niektórych substancji, a w tabl. 5.10 — recepturę suspensji przy badaniu zanieczyszczeń w oleju przy użyciu licznika Coultera wg danych f-my Coultronics France S.A.

Elektrolity muszą być dokładnie przefiltrowane aż do usunięcia wszystkich cząstek o takiej wielkości, o jakiej mogą być liczone. Zaleca się, aby wielkość poru filtru stanowiła 40% średnicy najmniejszej liczonej cząstki. Do filtrowania stosuje się filtry przeporno-owe, jak np.: Gelman, Bougies, Millipore. Stosowane są też filtry spiekane. Nigdy natomiast nie wolno używać filtrów papierowych, ponieważ pozostają częściowo w elektrolicie, osadzają się w mikro-otworze, są trudne do usunięcia z mikrootworu oraz wpływają ujemnie na wynik pomiaru.

Co pewien czas elektrolit należy zastąpić świeżym. Jeżeli mamy użyć innego elektrolitu, należy układ szklany opróżnić, przepłukać go starannie wodą destylowaną, a następnie napełnić nowym elektrolitem. Regularne opróżnianie i płukanie układu szklanego jest szczególnie ważne, gdy używane elektrolity mają skłonność do strącania się i koagulacji. W celu zapobieżenia sedymentacji dużych cząstek w elektrolicie zaleca się mieszać roztwór z ciężkimi cząstkami specjalnym mieszalnikiem.

Czyszczenie mikrootworu. Dokładna analiza cząstek jest możliwa tylko wtedy, jeśli mikrootwór jest idealnie czysty, ponieważ wszelkie ograniczenia średnicy efektywnej przez nagromadzone cząstki, odpadki lub inne obce wtrącenia „fałszują” odczowanie otworu. Jeśli otwór jest całkowicie zapchany, przyrząd przestaje liczyć. Jeśli jest zapchany częściowo, licznik gwałtownie zwolni liczenie i oscyloskop przerwie impulsy lub liczenie stanie się nieregularne i ekran oscyloskopu wykaże zakłócenia. Objawy te są zazwyczaj niezawodnymi wskaźnikami zapchania otworu, ale są trudne do wykrycia przy bardzo małej koncentracji cząstek z powodu bardzo wolnego liczenia. Dlatego otwór sprawdza się pod mikroskopem i dodatkowo można sprawdzić czy czas liczenia nie przekroczy czasu podanego w tabl. 5.11 (dla licznika Celloscope 302).

Czyszczenie mikrootworu przebiega następująco:

1) Naczynie z mikrootworem połączyć z układem dozującym przez odpowiednie ustawienie zaworu, a następnie kilkakrotnie ostro przycisnąć oczyszczacz otworu. Jeśli otwór był częściowo tylko zapchany, powinno to spowodować jego oczyszczenie.

2) Jeżeli nie nastąpiło oczyszczenie otworu w p. 1, wówczas należy przestawić zawór łączący układ dozujący i naczynie z mikrootworem z butlą próżniową, a następnie łącząc ponownie na-

Tablica 5.11. Charakterystyczne parametry przyrządu Celloscope 302

Średnica otworu	Zakres średni cząstek	Układ dozujący	Czas zliczania	Koncentracja cząstek	Średnie odchylenie
μm	μm	ml	s	liczba/ml	%
30	0,6-9	0,05	18	4000-250000	0,6
		0,1	35	2000-250000	0,9
48	1,0-15	0,1	15	2000-90000	1,0
76	1,5-22	0,5	30	400-30000	0,8
100	2,0-30	1,0	30	200-15000	0,8
120	2,5-37	1,0	20	200-8000	1,1
150	3,0-45	1,0	11	200-5000	1,4
		2,0	22	100-5000	1,0
190	4,0-60	2,0	14	100-2000	1,6
300	6,0-90	5,0	16	40-1000	1,4
400	8,0-120	5,0	9	40-500	2,0

czynnie z mikrootworem z układem dozującym. Obniżyć probówkę i obrócić naczynie z mikrootworem aż mikrootwór znajdzie się ponad poziomem elektrolitu, wtedy przetrzeć otwór cienką gumową lub plastikową rurką aż pęcherze powietrza zaczną wypływać, wskazując że otwór jest wolny.

3) Jeżeli nie nastąpiło oczyszczenie w p. 2, to należy obrócić zawór łącząc układ dozujący i naczynie z mikrootworem z próżnią i trzymać ciekłą rurkę naprzeciw otworu, następnie przedmuchiwać, aż otwór będzie wolny.

4) Jeżeli oczyszczenie w p. 3 nie przyniesie rezultatów, wtedy należy wyjąć naczynie z mikrootworem i przepłukać pod bieżącą wodą, osuszyć. Po całkowitym osuszeniu napełnić naczynie kwasem chromowym i umieścić w probówce z kwasem chromowym na co najmniej 5 minut. Następnie przepłukać, aby usunąć wszelkie ślady kwasu chromowego, napełnić danym elektrolitem, umieścić z powrotem w zespole czujnikowym i napełnić szklany układ elektrolitem.

Należy pamiętać o tym, że naczynie z mikrootworem musi być całkowicie suche zanim będzie napełnione kwasem chromowym, ponieważ gwałtowny wzrost temperatury, jaki będzie temu towarzyszył, może uszkodzić spoinę szafir-szkło.

Cechowanie przyrządu. Cechowanie w tym przypadku polega na przypisaniu każdej działce skali dyskryminatora objętości (μm^3) lub równoważnej średnicy (μm) cząstki. Operacji tej dokonuje się przy zastosowaniu cząstek o znanym wymiarze. Najczęściej stosowanymi do cechowania roztworami są: lateks, roztwór pyłków i zarodników roślin, proszki (np. proszek szlifierski Al_2O_3), krew.

Urządzenia kontrolne. Najważniejszym pomocniczym urządzeniem przyrządu jest oscyloskop. Obraz impulsów na jego ekranie umożliwia kontrolowanie prawidłowości pracy czujnika (czystość otworu, nieuszkodzenie czujnika), układu hydraulicznego (nieobecność powietrza), wzmacniacza (brak samowzbudzenia), dyskryminatora (prawidłowe ustawienie progu). Oscyloskop bardzo ułatwia nastawienie przyrządu przy zmianie czujnika i współczynnika wzmocnienia. *Mikroskop* służy do kontroli mikrootworu. Wszystkie liczniki Coultera, a także przyrządy Celloscope 302 i CG2 zawierają długoogniskowy mikroskop i źródło światła. Model F licznika Coultera ma urządzenie mikroprojekcyjne, którego ekran znajduje się obok ekranu oscyloskopu.

Wszystkie przyrządy z licznikiem mechanicznym mogą dodatkowo kontrolować prawidłowość funkcjonowania przyrządu opierając się na regularności trzasków licznika (sygnalizator dźwiękowy).

W modelach B i F licznika Coultera nie zawierających mechanicznego licznika jest włączony specjalny sygnalizator dźwiękowy (telefon) między czwartym a piątym dekatronem. Ponadto liczniki są wyposażone w generator impulsów wzorcowych stosowany do kontroli pracy dyskryminatora i licznika.

5.6.7. Rodzaje analizatorów

Analizator Coultera (firmy Coulter Electronics) *model A* (do zastosowania w przemyśle). Analizator ten jest przeznaczony do określania stężenia i wymiarów cząstek. Czujniki wymienne z otworami o średnicy $30 \div 560 \mu\text{m}$. Zakres pomiarowy $1 \div 250 \mu\text{m}$. Na życzenie odbiorcy są dostarczane jeszcze dwa czujniki z żądanymi mikrootworami. Układ hydrauliczny z układami dozującymi 50, 500, 2000 mm^3 . Analizator ma mieszadło.

Analizator Coultera model B. Składa się on z dwóch bloków: licznika (model B) i przystawki rejestrującej (model J). Ponieważ analizator ten ma dyskryminator szczelinowy, można za jego pomocą wyznaczyć krzywą rozkładu wymiarów cząstek. Szybkość pomiaru wynosi 25 punktów w ciągu 100 sekund. Model B jest produkowany w dwóch wersjach: dla medycyny i dla przemysłu.

Analizator Coultera model C. Umożliwia on automatyczne rejestrowanie krzywych rozkładu za pomocą amplitudowego analizatora 12-kanalowego. Jest to najbardziej zautomatyzowany model. Liczbę kanałów można zmieniać wyłączając poszczególne kanały. Po zarejestrowaniu określonej liczby cząstek przyrząd automatycznie wyłącza się. Rejestrację krzywych można sporządzić na papierze, taśmie perforowanej lub taśmie magnetycznej.

Analizator Coultera model D. Jest on przeznaczony do liczenia erytrocytów i leukocytów. Najprostszy i stosunkowo tani model. Zawiera czujnik o średnicy otworu 100 μm , układ dozujący 500 mm^3 i urządzenia pomocnicze.

Analizator Coultera model F. Zastępuje on model A i różni się od niego tym, że zespoły czujnikowy i liczący znajdują się w jednym bloku. Wszystkie układy analizatora są realizowane na półprzewodnikach, zamiast mikroskopu znajduje się urządzenie mikroprojekcyjne, a zamiast licznika mechanicznego — dekatron. Zmodernizowany model F_N , charakteryzuje się tym, że dekatrony są zastąpione licznikami ze wskazaniem neonowym.

Analizator Coultera model T. Jest to najprostszy model przeznaczony dla przemysłu. W tabl. 5.12 podano stosowane w licznikach Coultera średnice mikrootworów i odpowiadające im zakresy pomiarowe.

Tablica 5.12. Średnice mikrootworów i odpowiadające im zakresy pomiarowe w licznikach Coultera

Średnica otworu μm	Zakres pomiaru μm	Średnica otworu μm	Zakres pomiaru μm
30	0,6–12	200	4–80
50	1–20	280	6–120
70	1,5–30	400	8–160
100	2–40	560	12–240
140	3–60		

Analizator Celloscope 202 (firmy AB Lars Ljungberg and Co.). Analizator ten jest stosowany w przemyśle. Zawiera dwa dyskryminatory progowe i dwa liczniki, co znacznie zmniejsza czas pomiaru. Dostarczony jest z kompletem czujników o średnicach mikrootworu 30÷400 μm , kompletem układów dozujących 50÷5000 mm^3 oraz elektromagnetycznym mieszadłem.

Analizator Celloscope 302. Przyrząd ten jest zmodyfikowanym analizatorem Celloscope 202. Zespół czujnikowy i liczący znajdują się w oddzielnych blokach. Komplet czujników zawiera mikrootwory w szafirze o średnicach od 30 do 400 μm oraz w szkle o średnicach 600 i 800 μm . Zakres pomiarowy 0,6÷300 μm . Komplet układów dozujących zawiera układy jednozakresowe 0,05; 0,1; 0,5; 1,2 i 5 ml oraz układ trójzakresowy dla 0,05; 0,2 i 1 ml. Dokładność układu dozującego wynosi $\pm 0,0002$ ml na 1 ml i $\pm 0,0008$ ml w przypadku większych próbek. Model ten dodatkowo zawiera mikroskop do kontroli mikrootworu.

Analizatory wyprodukowane w NRD. Granulometr CG1 ma zastosowanie w medycynie i w przemyśle. Zawiera dyskryminator

szczelinowy i liczniki dekatronowe. Wiele operacji pomiarowych jest zautomatyzowanych. *Granulometr CG2* jest przeznaczony tylko dla przemysłu. W porównaniu z modelem CG1, model CG2 ma rozszerzony zakres zmiany prądu czujnika i wzmocnienia, elektromechaniczne mieszadło, mikroskop do kontroli mikrootworu. Liczniki dekatronowe zastąpiono licznikami ze wskaźnikiem neonowym. Zespół czujnikowy i liczący znajdują się w dwóch oddzielnych blokach.

Wyżej opisane analizatory są zautomatyzowane. Praca na modelach analizatora Coultera A, B i D i modelach analizatora Celloscope 101, 202 i 302 wymaga wykonania trzech zasadniczych czynności, z których dwie polegają na manipulacji zaworem i jedna na skasowaniu licznika. W modelu F praca wymaga dwóch operacji ręcznych (skasowanie licznika odbywa się automatycznie). Przyrządy CG1 i CG2 i Celloscope. 401 wymagają jednej czynności ręcznej (praca układu hydraulicznego jest sterowana zaworem magnetycznym). W niektórych analizatorach istnieją urządzenia automatycznie zapobiegające wyrzuceniu rtęci z manometru i przedostaniu się cieczy do pompy próżniowej przy przepelnionym zbiorniku oraz urządzenia wyłączające prąd czujnika po wykonaniu liczenia i zmieniające jego biegunowość (w celu zmniejszenia następstw elektrolizy).

5.6.8. Zalety i wady analizatorów

Z a l e t y:

- szeroki zakres pomiarowy $0,3 \div 800 \mu\text{m}$;
- proporcjonalność amplitudy i impulsu do objętości cząstki, w wielu przypadkach objętość jest bardziej obiektywną wielkością charakteryzującą cząstki, gdyż nie zależy od położenia względem oka obserwatora, obiektu mikroskopu czy sita;
- duża szybkość pomiaru dochodząca do 10 000 cząstek na 1 sekundę, umożliwiająca skrócenie czasu pomiaru do $10 \div 15$ min, a w przypadku analizatorów wielokanałowych nawet do kilkudziesięciu sekund;
- duża dokładność pomiaru i powtarzalność wyników; często liczniki Coultera stosuje się jako wzorce dla innych przyrządów;
- możliwość określenia znikomych stężeń cząstek;
- możliwość bezpośredniego otrzymania różniczkowej krzywej rozkładu;
- prosta konstrukcja i stosunkowo niewysoka cena.

W a d y:

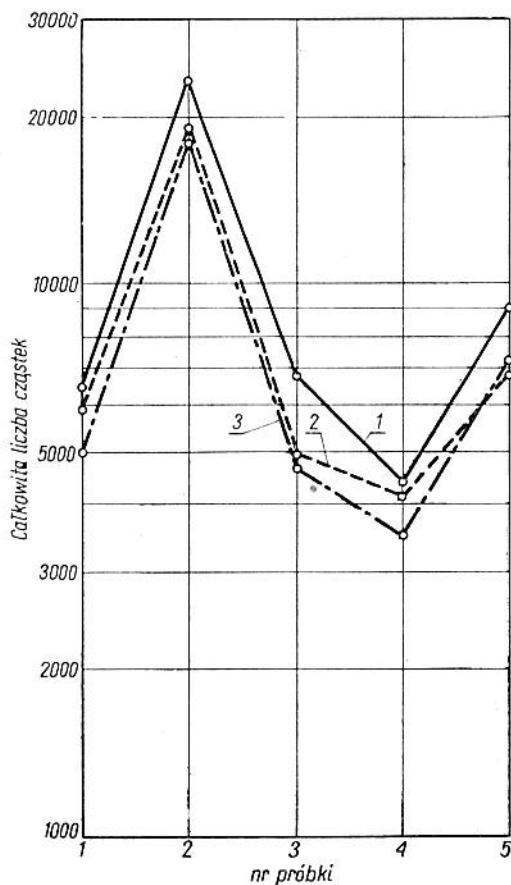
- mniejszy niż w innych metodach zakres pomiarowy uzyskany za pomocą tylko jednego czujnika; nie przekracza on stosun-

ku 40 : 1 średnic mierzonych cząstek i 64 000 : 1 objętości mierzo-
nych cząstek;

— konieczność rozpraszania mikroobiektów (uprzednio wstęp-
nie przygotowanych, jak np. odfiltrowanie z oleju) z zachowaniem
ich wielkości i skupienia;

— konieczność ciągłej kontroli czystości otworu czujnika.

Na rys. 5.47 przedstawiono przykładowy wykres porównawczy
metod pomiaru zanieczyszczeń; licznikiem Coultera, mikroskopem
optycznym i urządzeniem skanującym, a w tabl. 5.13 podano ze-
stawienie trudności występujących w eksploatacji analizatorów
z czujnikiem konduktometrycznym.



Rys. 5.47. Porównanie wyników analizy pięciu próbek: 1 — licznikiem Coul-
tera, 2 — mikroskopem, 3 — urządzeniem skanującym

Tablica 5.13. Występujące w pomiarach konduktometrycznych trudności i sposoby ich likwidacji

Trudności	Sposoby ich likwidacji
1	2
Cząstki częściowo rozpuszczają się w elektrolicie	przygotować zawiesinę cząstek w nasyconym roztworze elektrolitu
Cząstki z łatwością rozpuszczają się w elektrolicie	zmienić elektrolit
Cząstki są rozproszone w oleju, który nie przewodzi prądu elektrycznego	rozpuścić olej w elektrolicie tak, aby powstał roztwór, przy małej koncentracji cząstek odfiltrować olej
Cząstki koaguluja: a) koagulacja mechaniczna b) koagulacja magnetyczna c) koagulacja elektrostatyczna d) sklejanie	intensywnie mieszać zawiesinę za pomocą fal ultradźwiękowych zmieszać zawiesinę, szybko przeprowadzić pomiar dodać substancję dyspergującą (powierzchniowo-czynną) wymienić elektrolit, dodać żelatyny
Na cząstkę oddziałuje zmiana pH	zmienić pH roztworu
Zachodzi reakcja chemiczna między cząsteczkami a elektrolitem	zmienić elektrolit
Cząstki sedymentują	włączyć mieszadło, dodać substancję, zwiększyć lepkość lub gęstość elektrolitu
Cząstki „puchną”	zmienić elektrolit

5.7. Metody kolmatacyjne

5.7.1. Uwagi ogólne

Przy zastosowaniu metod opartych na zjawisku *kolmatacji* nie uzyskuje się informacji o pojedynczej cząstce (jak w metodach optycznych czy elektrycznych), lecz o grupie cząstek jako całości. Metody te umożliwiają zbadanie stopnia zanieczyszczenia cieczy przez badanie skutków ich działania w układzie hydraulicz-

nym. Urządzenia tu używane symulują pracę układu hydraulicznego.

Istnieje obecnie tendencja, aby zbudować przyrząd, który umożliwiłby sklasyfikowanie cieczy pod względem stopnia jej czystości. Coraz częściej poziom czystości cieczy hydraulicznej wyraża się klasami czystości. Jednak przyjęte klasy czystości nie zawsze są korzystne do celów praktycznych, ponieważ często dana próbka cieczy hydraulicznej zawiera pewną liczbę cząstek powyżej 5 μm mieszczącą się w granicach pewnej klasy, natomiast w innych zakresach wymiarowych cząstek granice tej klasy mogą być przekroczone. Prowadzone są badania nad budową przyrządów pomiarowych i ustaleniem innych wskaźników czystości cieczy hydraulicznej opartych na zjawisku kolmatacji.

Kolmatacja, jest to zjawisko zatrzymywania w ośrodku porowatym cząstek zawiesiny znajdujących się w płynie podczas przepływu przez ten ośrodek. Wynikiem kolmatacji jest zmiana koncentracji cząstek zawiesiny w płynie po przejściu przez ośrodek porowaty. Na proces kolmatacji składają się dwa zjawiska: kolmatacja wymiarowa (mechaniczna) i kolmatacja niewymiarowa (energetyczna).

Kolmatacja wymiarowa polega na zatrzymywaniu cząstek zawiesiny przez przegrodę porowatą wskutek różnic wymiarowych między cząstkami zawiesiny a porami.

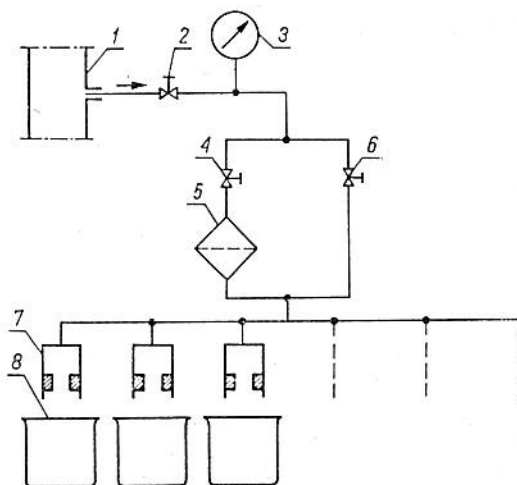
Kolmatacja niewymiarowa nie zależy od różnic wymiarowych między cząstkami a porami; spowodowana jest przez: obliterację, adhezję, siły hydrodynamiczne i inne zjawiska natury fizyko-chemicznej.

Kolmatomierzem nazywa się urządzenie wykorzystujące zjawisko kolmatacji mechanicznej na szczelinie o stałych i ściśle określonych wymiarach. Kolmatomierze są budowane głównie do badania cieczy i mogą być wyposażane w jedną lub więcej szczelin, których wymiary są jednoznacznie ustalone przez konstrukcję elementów składowych szczeliny, albo nastawiane w zależności od potrzeby wynikającej z zakresu określonych wymiarów cząstek zanieczyszczeń w cieczy. Budowa kolmatomierza opiera się na takim rozwiązaniu szczeliny, aby jej najmniejszy wymiar przekroju przepływowego był mniejszy od największych cząstek mierzonych zanieczyszczeń. Znając wymiary szczeliny kolmatomierza oraz jego wyposażenie w przyrządy pomiarowe ciśnienia i natężenia przepływu, można przeprowadzać pomiary zmian parametrów przepływającej cieczy w czasie oraz określać na podstawie tych zmian, koncentrację i rozkład wymiarowy cząstek zanieczyszczeń. Informacje o ilości zanieczyszczeń w zakresach określonych wymiarami szczelin kolmatomierza umożliwiają wyznaczenie odpowiednich punktów charakterystyki odfiltrowania. Pomiary przy użyciu kol-

matomierza polegają na jego podłączeniu do źródła cieczy z zanieczyszczeniami, znajdującej się pod ciśnieniem umożliwiającym jej przepływ przez szczeliny. Kolmatomierz może być podłączony zarówno do źródła ciśnienia jak i przepływu cieczy roboczej.

5.7.2. Kolmatomierz zmiennego przepływu ze szczeliną prostokątną

Na rys. 5.48 przedstawiono w przykładowym rozwiązaniu schemat układu pomiarowego koncentracji i rozkładu wymiarów cząstek zanieczyszczeń w cieczy przy użyciu kolmatomierza. Układ pomiarowy składa się z: generatora stałego ciśnienia cieczy zanieczyszczonej 1, zaworu ustalającego ciśnienie zasilania 2, manometru kontrolnego 3, rozgałęzionego przewodu wyposażonego w jednym torze w zawór odcinający 4 i filtr ultradokładnego oczyszczacza 5, a w drugim torze — tylko w zawór odcinający 6 oraz równolegle połączone komory ze szczelinami o prostokątnym przekroju przepływowym 7, za którymi umieszczono cylindry pomiarowe natężenia przepływu 8.

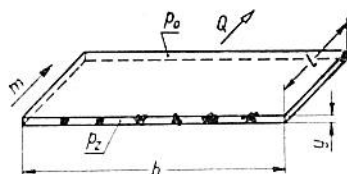


Rys. 5.48. Schemat ideowy kolmatomierza równoległego

nia 5, a w drugim torze — tylko w zawór odcinający 6 oraz równolegle połączone komory ze szczelinami o prostokątnym przekroju przepływowym 7, za którymi umieszczono cylindry pomiarowe natężenia przepływu 8. Pomiar rozpoczyna się od nastawienia stałej wartości ciśnienia zasilania, ustalenia temperatury cieczy, wyzerowania wymiarów przepływowych szczelin i zmierzenia natężenia przepływu czystej cieczy przez każdą ze szczelin przy zamkniętym zaworze odcinającym 6. Dalsza część pomiarów polega na określeniu zmian natężenia przepływu cieczy zanieczy-

szczelnej przez szczeliny przy zamkniętym zaworze 4 i otwartym zaworze odcinającym w funkcji czasu 6. Wykonanie pomiarów początkowej i bieżących wartości natężenia przepływu przez poszczególne szczeliny kolmatomierza, umożliwi na podstawie niżej wprowadzonych zależności — przy odpowiednim doborze szczelin — obliczenie koncentracji i rozkładu wymiarów cząstek zanieczyszczeń w przepływającej przez te szczeliny cieczy.

Niech p_z będzie ciśnieniem generatora ciśnienia cieczy obciążonego elementem impedancyjnym w postaci szczeliny (kolmatomierza) o prostokątnym przekroju przepływu, a p_0 ciśnieniem za tym elementem (rys. 5.49). Generator ciśnienia wymusza przepływ cieczy Q w kierunku m przy różnicy $p_z - p_0 > 0$, przez szczelinę kolmatomierza o wymiarach b i y spełniających warunek $b \gg y$.



Rys. 5.49. Przepływ cieczy przez szczelinę kolmatomierza

Narzucamy również warunek, aby długość przepływowa szczeliny l była niezbyt duża, w porównaniu z y . Jeżeli założymy ustalony i płaski ruch cieczy, liniowy spadek ciśnienia $dp/dl = (p_z - p_0)/l$ oraz pominiemy wpływ niedokładności geometrycznych szczeliny na warunki przepływu, to natężenie przepływu będzie określone zależnością

$$Q = \frac{by^3}{12\eta l} (p_z - p_0) \quad (5.67)$$

gdzie η — współczynnik lepkości dynamicznej przepływającej cieczy.

Przyjmujemy dalej, że temperatura i ciśnienie nie zmieniają się, a koncentracja zanieczyszczeń z jest taka, iż jest pomijalny jej wpływ na lepkość przepływającej cieczy. Niech zanieczyszczenia w cieczy opisane funkcją gęstości rozkładu prawdopodobieństwa ich ilości $g(x, t) = g_0(x)$ będą zatrzymywane przez szczelinę tylko wtedy, gdy cząstki o wymiarach x są większe od wymiaru szczeliny y i po zatrzymaniu każdej cząstki zanieczyszczenia następuje zmniejszenie wymiaru b szczeliny o y . Możemy zatem przyjąć, że szczelinę kolmatomierza opisuje funkcja gęstości hydrodynamicznej $k(y)$, którą możemy aproksymować rozkładem jednopunktowym Diraca. Stąd wynika wniosek, że dystrybuanta hydrodynamiczna szczeliny $K(y) = e_f(x > y; t) = 1$. Sprowadziliśmy

w ten sposób rolę szczeliny kolmatomierza do roli „filtru idealnego”, zatrzymującego wszystkie cząstki zanieczyszczeń o wymiarach $x > y$. Jeżeli dokonamy podziału przekroju przepływowego szczeliny na hipotetyczne „pory”, których ilość w chwili $t = 0$, $n_p = b/y$, a po czasie $t > 0$ będzie funkcją zmniejszającą się, zależną od ilości zatrzymanych cząstek $n_c(t)$, to natężenie przepływu

$$Q(t) = k[n_p - t n_c(t)] \quad (5.68)$$

gdzie: k — stała szczeliny kolmatomierza, $n_c(t)$ — ilość zatrzymanych cząstek zanieczyszczeń w jednostce czasu.

We wzorze (5.68) wyrażenie $n_p - t n_c(t)$ określa ilość niezatka-nych „porów” szczeliny kolmatomierza w czasie t . Na podstawie rozważań przeprowadzonych wcześniej (rozdz. 4) można napisać, że $n_c(t)$ wyraża *intensywność dopływu do szczeliny cząstek zanieczyszczeń* o wymiarach $x > y$. Zatem dla poczynionych tutaj założeń

$$n_c(t) = [1 - G_0(y)] zQ(t) \quad (5.69)$$

zatem

$$Q(t) = k \{n_p - t [1 - G_0(y)] zQ(t)\} \quad (5.70)$$

i stąd

$$Q(t) = \frac{kn_p}{1 + kzt[1 - G_0(y)]} \quad (5.71)$$

a ponieważ $Q(t = 0) = kn_p = Q_0$, więc ostatecznie otrzymujemy

$$\frac{Q(t)}{Q_0} = \frac{1}{1 + kzt[1 - G_0(y)]} \quad (5.72)$$

Stałą szczeliny kolmatomierza k wyznaczamy z warunku przepływu początkowego Q_0 przez porównanie go z natężeniem przepływu Q określonym zależnością (5.67)

$$k = \frac{p_z - p_0}{12\eta l} y^4 \quad (5.73)$$

Uzasadnienia postaci (5.73) dokonujemy przyjmując, że natężenie przepływu przez każdy fikcyjny por Q_p szczeliny w przekroju kwadratowym jest iloczynem średniej prędkości cieczy w szczelinie $v_{sr} = \frac{dp}{12\eta dl} y^2$ i przekroju poru by/n_p , czyli $Q_p = v_{sr} y^2$. Przepływ przez całą szczelinę wynosi $kn_p = Q_p n_p$. Przyjęliśmy liniowy spadek ciśnienia, zatem podstawiając $dp/dl = p_z - p_0/l$ do v_{sr} , otrzymamy postać (5.73).

Wzór (5.73) wyprowadzono stosując wiele uproszczeń w odniesieniu do procesu kolmatacji mechanicznej w szczelinie kolmato-

mierza. Chociaż wyznaczona tutaj zmiana natężenia przepływu w wyniku zatykania przekroju przepływowego szczeliny przez cząstki zanieczyszczeń jest niezupełnie ścisła, umożliwia jednak dzięki prostym zależnościom, szybkie obliczenie koncentracji i rozkładu wymiarowego cząstek zanieczyszczeń w cieczy roboczej, a przez to ocenę efektywności filtrowania.

Wzór (5.72) dla celów wyznaczenia koncentracji i rozkładu zanieczyszczeń przy użyciu kolmatomierza zmiennego przepływu zmodyfikujemy uwzględniając zasadę działania kolmatomierza. Przez szczelinę o wymiarze y przepływają wszystkie cząstki zanieczyszczeń o wymiarach $x \leq y$ i dlatego dystrybuanta $G_0(y)$ dla wymiarów zanieczyszczeń $x = y$ jest równa 0. Koncentracja zanieczyszczeń występująca we wzorze określa występowania wszystkich cząstek w cieczy o wymiarach $x > y$. W celu uproszczenia i uściślenia zapisu, oznaczamy stosunek $Q(t)$ do Q_0 dla określonej szczeliny o wymiarze y przez B_y , stałą szczeliny kolmatomierza przez k_y oraz z przez $z(x > y)$. Otrzymamy zatem

$$B_y = \frac{1}{1 + k_y z(x > y) t} \quad (5.74)$$

$$z(x > y) = \frac{1 - B_y}{B_y k_y t} \quad (5.75)$$

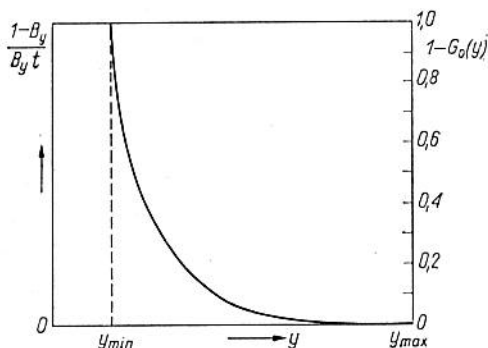
Dla wartości $B_y = 0,5$, koncentracja zanieczyszczeń większych od wymiaru y szczeliny kolmatomierza będzie równa odwrotności iloczynu stałej k_y i czasu t przepływu cieczy, przy którym natężenie zmalało o połowę. Jeżeli zachowamy warunek konstrukcyjny kolmatomierza tak, aby stałe k_y dla poszczególnych wartości y szczelin były sobie równe, to wyznaczenia rozkładu $1 - G_0(y)$ zanieczyszczeń można dokonać bez konieczności obliczania koncentracji $z(x > y)$ i stałej k_y . Wzór (5.75) zapiszemy w postaci

$$z(x > y) k_y = \frac{1 - B_y}{B_y t} \quad (5.76)$$

i w ten sposób po prawej stronie znalazły się parametry uzyskane z pomiarów, a lewa strona określa rozkład wymiarów zanieczyszczeń w zakresie wartości szczelin kolmatomierza od y_{min} do y_{max} , przy których wszystkie cząstki będą odpowiednio zatrzymane, tzn. $1 - G_0(y_{min}) = 1$, i przepuszczone, tzn. $1 - G_0(y_{max}) = 0$ (rys. 5.50).

Dla $B_y = 0,5$, punkty kodystrybuanty zanieczyszczeń $1 - G_0(y)$ dla poszczególnych wartości y obliczymy jako odwrotność czasu t przepływu cieczy przez szczelinę, przy którym natężenie zmalało o połowę.

Metoda doświadczalnego wyznaczania rozkładu zanieczyszczeń i pomiarów koncentracji $z(x > y)$ polega więc jedynie na określe- niu zmian natężenia przepływu $Q(t)$ w czasie w poszczególnych szczelinach kolmatomierza przy stałym spadku ciśnienia $p_z - p_0$ na szczelinie.



Rys. 5.50. Wykres przekształconej postaci natężenia przepływu w funkcji wymiarów porów

5.7.3. Przykład użycia kolmatomierza

Ilustracją opisanej metody wyznaczania koncentracji zanieczy- szczeń i rozkładu wymiarowego cząstek przy użyciu kolmatomierza zmiennego przepływu ze szczeliną prostokątną będzie przykład ba- dania cieczy przefiltrowanej przez filtr węglony o nominalnej do- kładności ok. 22 μm . Kolmatomierz wyposażony w sześć szczelin o wymiarach $y_1 = 5 \mu\text{m}$, $y_2 = 10 \mu\text{m}$, $y_3 = 15 \mu\text{m}$, $y_4 = 20 \mu\text{m}$, $y_5 = 25 \mu\text{m}$ i $y_6 = 30 \mu\text{m}$, zasilano cieczą o lepkości $\eta = 0,3 \text{ P}$, pod ciśnieniem stałym $p_z = 30 \text{ kG/cm}^2$ ($p_0 = 0$). Długość l szczeliny wynosiła 2 mm. Dokonano pomiarów przepływu $Q(t)$ przez po- szczególne szczeliny (rys. 5.51) i na podstawie ich przebiegu dla poszczególnych wartości $B_y = 0,5$ obliczono koncentrację zanie- czyszczeń $z(x > y)$.

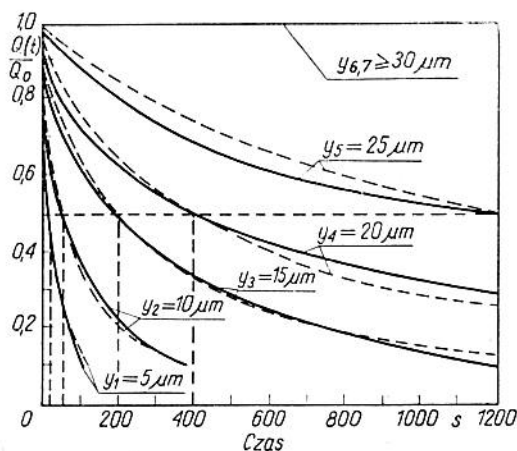
Zestawienie danych z pomiarów i obliczeń podano w tabl. 5.14. W kolumnie $z'(x > y)$ tabl. 5.14 podano dla porównania obliczenia koncentracji cząstek zanieczyszczeń w tej samej cieczy wykonane przy użyciu metody mikroskopowej, polegającej na przefiltrowa- niu cieczy przez bibułę 1÷3 μm , osuszeniu i przeniesieniu zanie- czyszczeń na szkiełko z podziałką mikrometryczną (Bürker) oraz użyciu mikroskopu z mikrometrem okularowym. Przy zastosowa- niu obu metod, tzn. z kolmatomierzem i mikroskopem istnieje duża zgodność wyników z pomiarów. Błąd pomiaru koncentracji

Tablica 5.14. Wyniki pomiarów przy użyciu kolmatomierza

y μm	$\frac{k_y}{s}$ $\frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$	t_s dla $B_y = 0,5$	$z(x > y)$ sztuk $\frac{\text{sztuk}}{100 \text{ ml}}$	$z'(x > y)$ sztuk $\frac{\text{sztuk}}{100 \text{ ml}}$
5	0,00256	15	$2,52 \cdot 10^6$	$2,71 \cdot 10^6$
10	0,041	52	$4,67 \cdot 10^4$	$4,72 \cdot 10^4$
15	0,208	195	$2,46 \cdot 10^3$	$2,50 \cdot 10^3$
20	0,655	400	$3,81 \cdot 10^2$	$3,89 \cdot 10^2$
25	1,55	1200	$5,30 \cdot 10^1$	$4,90 \cdot 10^1$
30	3,29	$\rightarrow \infty$	0	0

zanieczyszczeń w obu metodach nie przekracza 10%. Tak dużą zgodność wyników można uzyskać jedynie w przypadku, gdy pomiar natężenia przepływu odbywa się z dużą dokładnością przy utrzymaniu stałej temperatury cieczy i ciśnienia zasilania kolmatomierza. Znaczne trudności sprawia zachowanie ścisłego wymiaru szczeliny, który może ulegać wahaniom ze względu na duże wartości ciśnień zasilania oraz zmiany temperatury cieczy i otoczenia.

Obliczenie koncentracji zanieczyszczeń w cieczy i znajomość stałych szczelin kolmatomierza umożliwiającą opis zmian $B_y(t)$. Zgodność opisu aproksymującego zmiany natężenia przepływu przez szczeliny kolmatomierza w funkcji czasu z rzeczywistymi przebiegami pokazano na rys. 5.51, na którym liniami przerywanymi zaznaczono obliczone na podstawie wzoru (5.74) zależności $B_y(t)$ dla



Rys. 5.51. Charakterystyki przepływów cieczy przez kolmatomierz

poszczególnych szczelin. Wartość k_y i $z(x > y)$ wzięto z tabl. 5.14

$$B_5(t) = \frac{1}{1+0,064t}; B_{10}(t) = \frac{1}{1+0,019t}; B_{15}(t) = \frac{1}{1+0,00506t}$$

$$B_{20}(t) = \frac{1}{1+0,0025t}; B_{25}(t) = \frac{1}{1+0,00081t}$$

Indeks przy B w powyższych zależnościach oznacza wymiar szczeliny y w mikrometrach.

5.7.4. Budowa kolmatomierzy

Kolmatomierzem nazywamy układ połączonych ze sobą szczelin umożliwiający zbadanie rozkładu wymiarowego cząstek stałych w cieczy. Szczeliny mogą być ze sobą połączone równolegle lub szeregowo. Kolmatomierz z układem szczelin połączonych równolegle jest nazywany *kolmatomierzem równoległym*, natomiast z układem szczelin połączonych szeregowo — *kolmatomierzem szeregowym*.

Pomiaru czystości cieczy za pomocą kolmatomierza możemy dokonać przez:

1) pomiar ciągły wielkości towarzyszących przepływowi badanej cieczy przez szczelinę (Q , Δp) i obliczanie koncentracji cząstek z odpowiednich wzorów,

2) pomiar zmiany granicznej spadku ciśnienia na szczelinie przy stałym natężeniu przepływu lub granicznej zmiany natężenia przepływu przy stałym spadku ciśnienia.

Zakres pomiarowy kolmatomierza jest ograniczony obliteracją w przypadku małych szczelin i sedymentacją cząstek zanieczyszczeń o dużych wymiarach.

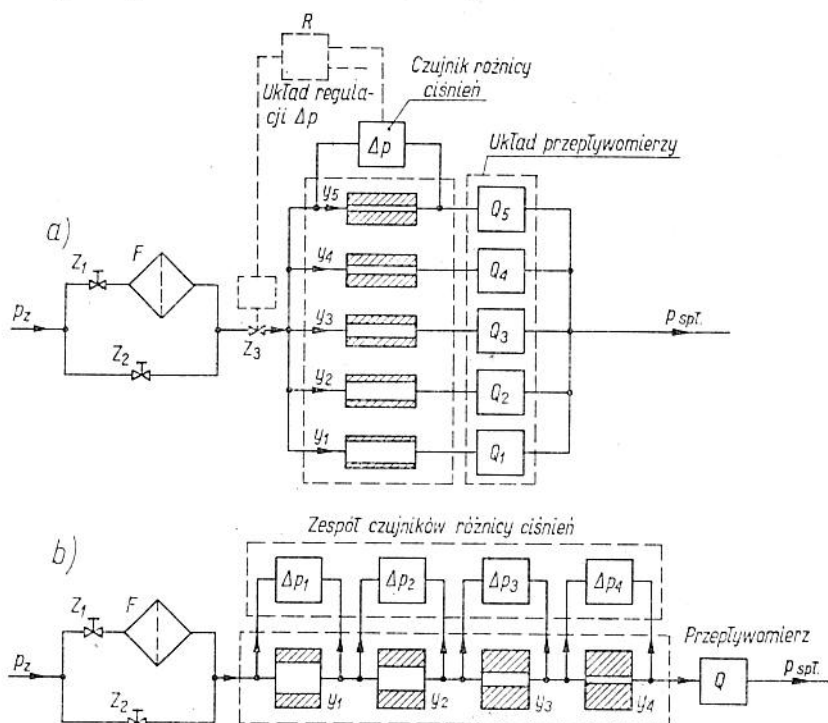
Do podstawowych zalet kolmatomierzy należą: możliwość wykorzystania pomiaru w warunkach eksploatacji urządzeń, niewrażliwość na warunki otoczenia, symulacja pracy układu hydraulicznego, prostota działania i budowy urządzenia, niewielkie wymiary gabarytowe, możliwość doboru dowolnych zakresów pomiarowych, możliwość dokonywania pomiaru ciągłego i granicznego.

Wady kolmatomierzy są następujące: trudności technologiczne przy wykonywaniu szczelin, zmiany wymiarów szczelin (np. przez czyszczenie), dość długi czas pomiaru, małe, kłopotliwe do mierzenia przepływy, trudności z zapewnieniem każdej szczelinie zbliżonej czułości, ograniczony zakres pomiarowy wskutek obliteracji szczelin i sedymentacji mierzonych cząstek.

Obliteracji szczelin można zapobiec poddając badaną ciecz hydrauliczną np. drganiom fal ultradźwiękowych. Sedymentację mo-

zemy wyrugować mieszając ciecz. Metody te jednak mogą wpłynąć na sfalszowanie pomiaru (koagulacja, rozbicie cząstek itp.). Ze względu na to, że zjawiska obliteracji i sedimentacji zachodzą również w rzeczywistym układzie, badania cieczy hydraulicznych przy użyciu kolmatomierza zapewniają uzyskanie wyników łatwych do przetransportowania na realne warunki eksploatacyjne.

Kolmatomierz równoległy. Zasada budowy kolmatomierza równoległego jest pokazana schematycznie na rys. 5.52a. Linia przerywaną oznaczono układ regulacji spadku ciśnienia na szczeliny



Rys. 5.52. Schematy blokowe kolmatomierzy: a) równoległego, b) szeregowego; Z_1 , Z_2 — zawory, Z_3 — zawór regulacyjny, F — filtr, R — regulator

linie. Spadek ciśnienia jest taki sam w czasie na każdej szczeliny. Ilość cząstek stałych oblicza się korzystając z odpowiednich wzorów lub nomogramów.

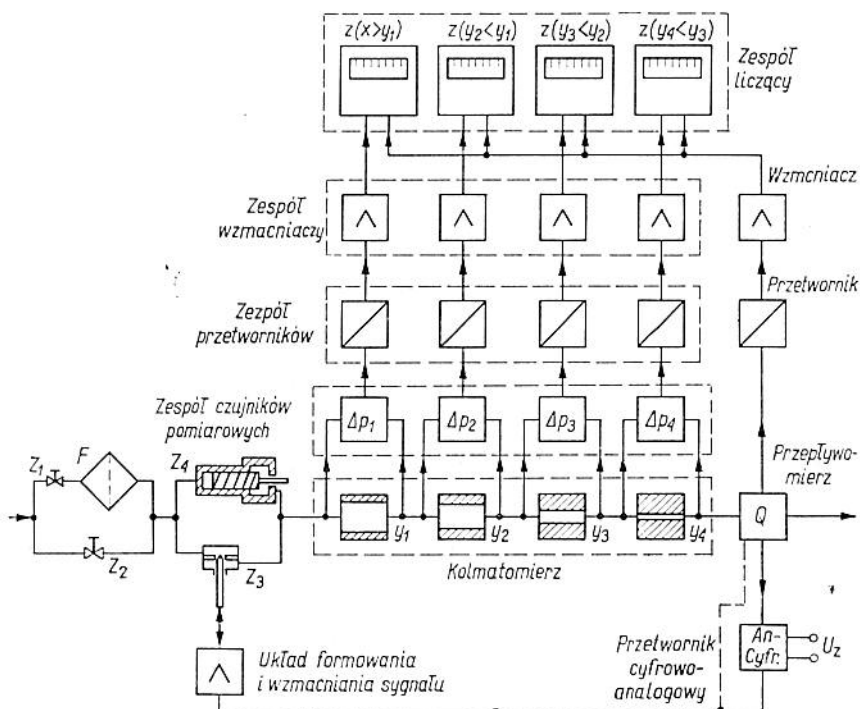
Zalety kolmatomierza równoległego w porównaniu z szeregowym są następujące:

— umożliwia uzyskanie dystrybuanty rozkładu wymiarów cząstek, z której można otrzymać rozkład wymiarów cząstek sta-

łych, gdyż każda szczelina daje informację o ilości cząstek o wymiarach $x > y_i$, gdzie y_i jest wymiarem (wysokością danej szczeliny),

- całkowite zatkanie jednej ze szczelin nie zakłóca działania całego kolmatomierza,
- istnieje łatwa możliwość regulacji szczelin,
- istnieje możliwość regulacji stałowartościowej spadku ciśnienia na szczelinie,
- przy zapewnieniu stałego spadku ciśnienia na szczelinie dokonuje się pomiaru tylko jednej zmiennej (natężenia przepływu),
- możliwy jest pomiar graniczny koncentracji cząstek przez graniczny pomiar natężenia przepływu przy stałym spadku ciśnienia na szczelinach.

Do w a d kolmatomierza równoległego w porównaniu z szeregowym należą:



Rys. 5.53. Schemat blokowy kolmatomierza szeregowego ze stałowartościową regulacją (ciągłą lub dwupołożeniową) natężenia przepływu z automatycznym przetwarzaniem danych o ilości zanieczyszczeń; Z_1, Z_2 — zawory, Z_3 — zawór regulacyjny, Z_4 — zawór nastawny, F — filtr

— pomiar natężenia przepływu, której najczęściej jest przepływem kropłowym, jest dokonywany w każdej ze szczelin osobno, co wpływa niekorzystnie na dokładność pomiaru,

— szczelina o małym wymiarze „atakowana” jest przez cząstki, których wymiar $x > y$, stąd taka cząstka jest liczona jako x/y cząstek, co zwiększa błąd pomiaru.

Kolmatomierz szeregowy. Zasada działania kolmatomierza szeregowego jest pokazana schematycznie na rys. 5.52. Natężenie przepływu jest w czasie we wszystkich szczelinach takie samo. Na rys. 5.53 przedstawiono schemat działania kolmatomierza szeregowego z regulacją stałowartościową Q i jego połączenie z układem liczącym. Pomiaru dokonujemy na wyjściu z kolmatomierza, przy czym zawór regulacyjny znajduje się przed kolmatomierzem. Z powodu bardzo małych przepływów rzędu $0,01 \div 0,1$ l/h regulacja jest utrudniona.

Zagadnienie to rozwiązano stosując regulację poprzez oddziaływanie na jeden z dwóch równolegle połączonych zaworów. Jeden z zaworów jest zaworem nastawnym, np. labiryntowym, jak na rys. 5.53, a drugi — zaworem zmiennym, np. kulkowym, stożkowym lub dysza-przysłona. Jeżeli na wyjściu z przepływomierza otrzymujemy sygnały dyskretne należy zastosować przetwornik cyfrowo-analogowy. Sygnał z przetwornika odpowiednio uformowany i wzmożony jest podawany na zawór regulacyjny.

Zalety kolmatomierza szeregowego w porównaniu z równoległym są następujące:

— natężenie przepływu jest mierzone w jednej gałęzi,

— większa dokładność niż w kolmatomierzu równoległym, gdyż wymiary zatrzymanych cząstek są zbliżone do wymiarów szczeliny,

— odpowiedzią kolmatomierza szeregowego jest rozkład wymiarów cząstek stałych w cieczy, z którego można otrzymać dystrybuantę rozkładu wymiaru cząstek.

Do wad kolmatomierza szeregowego w porównaniu z równoległym należą:

— całkowite zatkanie jednej ze szczelin uniemożliwia pracę całego kolmatomierza,

— pomiaru granicznego można dokonać jedynie przy skomplikowanej regulacji stałowartościowej natężenia przepływu.

Pomiar ciągłej ilości cząstek w cieczy. Pomiar ciągłej koncentracji cząstek stałych rozproszonych w cieczy hydraulicznej polega na ciągłym pomiarze w przypadku ogólnym (bez regulacji Q i Δp) spadku ciśnienia na szczelinie oraz natężenia przepływu Q w szczelinie. Pomiar ten odbywa się w sposób następujący:

1) Przed rozpoczęciem właściwego pomiaru dokonuje się pomiaru współczynnika lepkości dynamicznej η . W tym celu (rys. 5.52

i 5.53) należy zamknąć zawór Z_2 . Ciecz przepływająca przez szczeliny jest przefiltrowana (zakładamy, że nie zawiera zanieczyszczeń) przez filtr bardzo dokładnego czyszczenia lub submikronowy. Dokonujemy pomiaru natężenia przepływu Q_0 i spadku ciśnienia Δp na każdej ze szczelin.

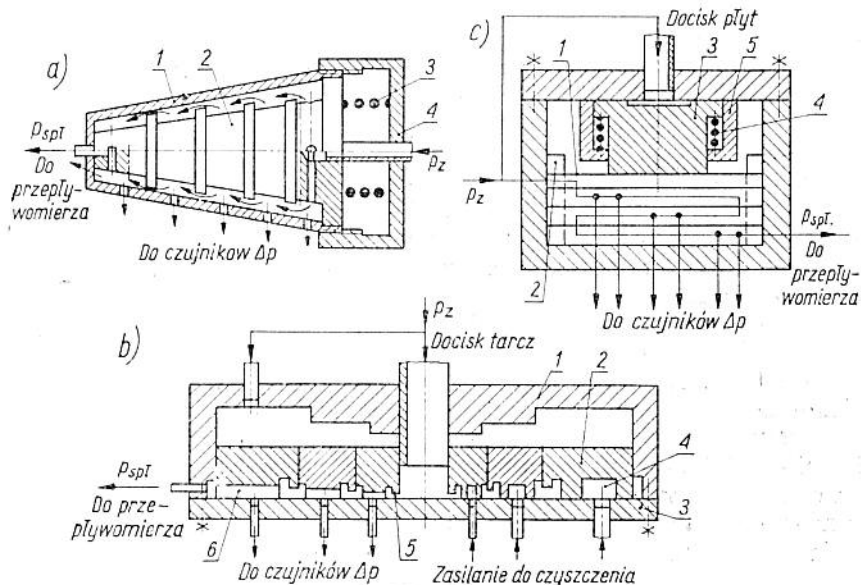
2) Zamykamy zawór Z_2 i otwieramy zawór Z_1 .

3) Pomiar możemy przerwać w dowolnej chwili przez zamknięcie zaworu Z_1 zarejestrowawszy natężenie przepływu Q w przepływomierzu oraz spadek ciśnienia Δp na każdej ze szczelin.

4) Ilość cząstek w danej objętości oblicza się przyjmując za podstawę objętości próbki równą 100 ml.

Powyższy sposób określania liczby cząstek w danym zakresie wymiarów dotyczy zarówno kolmatomierza równoległego jak i szeregowego. W przypadku kolmatomierzy z regulacją Q lub Δp przebieg pomiaru jest uproszczony.

Zaletą pomiaru ciągłego ilości cząstek w cieczy jest możliwość przekazania informacji o ilości cząstek i ich wymiarach do maszyny liczącej. Szczeliny pełnią tu rolę dyskryminatorów. Ponadto istnieje możliwość przerwania pomiaru w każdej chwili, przy czym pomiaru można dokonać zarówno z regulacją Q lub Δp , na szczelinie jak i bez niej. Wadą pomiaru ciągłego ilości cząstek w cieczy jest ciągły pomiar natężenia przepływu rzędu $0,01 \div 0,1$ l/h



Rys. 5.54. Schematy konstrukcyjne kolmatomierzy szeregowych

o charakterze kropłowym lub regulacja stałowartościowa tego przepływu. Na rys. 5.54 przedstawiono schematy konstrukcyjne kilku kolmatomierzy szeregowych.

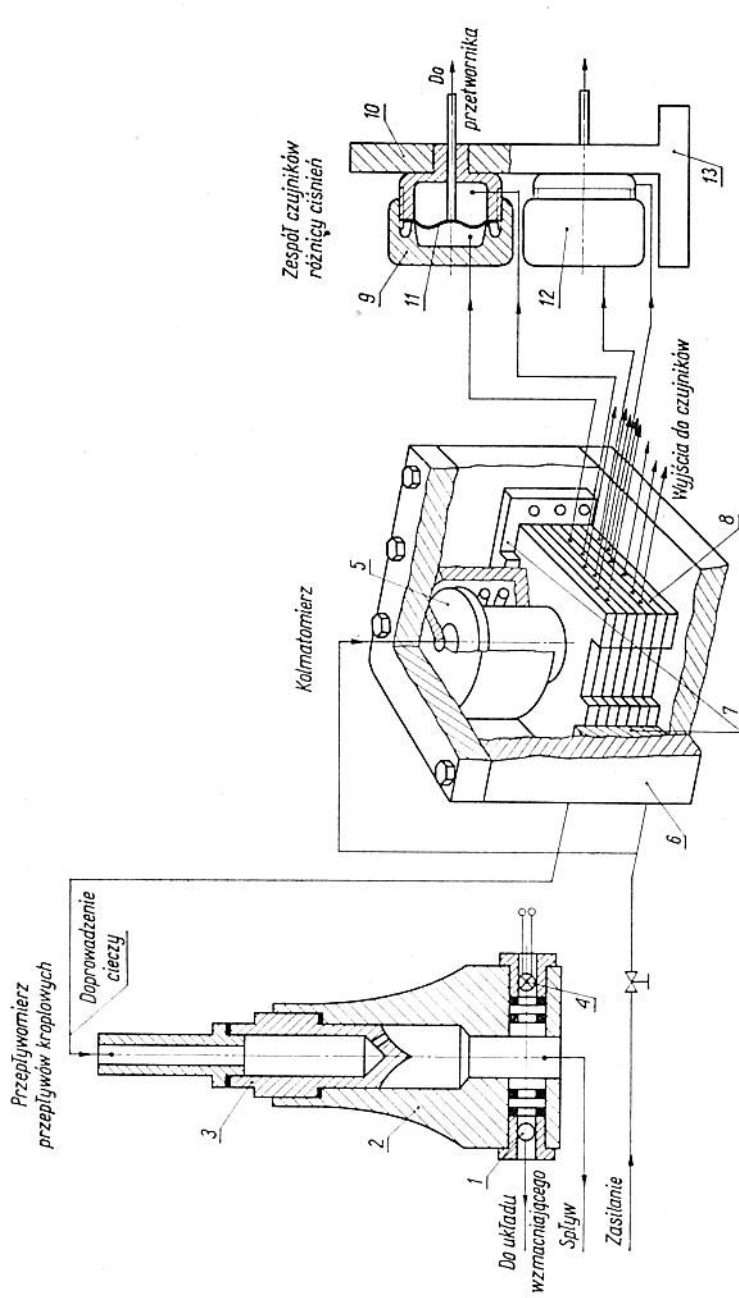
Kolmatomierz przedstawiony na rys. 5.54a składa się ze stożkowej tulei 1, wewnątrz której znajduje się trzpień 2. Luzy między stożkowymi powierzchniami wyfrezowanych tarcz trzpienia tworzą układ szeregowo ze sobą połączonych szczelin. Trzpień jest dociśnięty do denka tulei za pomocą sprężyny 3 i nakrętki 4. Urządzenie może być automatycznie czyszczone przez niewielki wysuw trzpienia z tulei. Zaletami konstrukcji tego kolmatomierza są: prosta budowa, łatwa rozbieralność, możliwość automatycznego czyszczenia oraz łatwe połączenie z aparaturą pomiarową.

Aby urządzenie zapewniało taki sam spadek ciśnienia na poszczególnych szczelinach wymiary szerokości przepływowej szczelin powinny tworzyć szereg potęgowy zależny od stanu przepływu. Spełnienie tego warunku wymaga stosunkowo dużych wymiarów gabarytowych lub powierzchni bocznej utworzonej przez obrót krzywej wykładniczej, co jest trudne do wykonania (i stosunkowo niewiele zmniejsza wymiary analizatora) oraz powoduje kłopotliwe nastawienie szczelin.

Wady powyższej nie ma kolmatomierz przedstawiony na rys. 5.54b, składa się on z obudowy 1, wewnątrz której znajduje się zespół współosiowo ułożonych pierścieni 2. Pierścienie są dociśnięte do podstawy 3 na skutek oddziaływania ciśnienia takiego samego jakie jest na wejściu kolmatomierza. Szczelina 5 tworzy się na wewnętrznej krawędzi każdego z pierścieni między pierścieniem a podstawą. Ciecz przedostaje się do szczeliny w następnym pierścieniu przez kanał 6 nacięty promieniowo w dolnej płaszczyźnie pierścienia.

Kolmatomierz ten może być automatycznie oczyszczony. Demontaż zespołu płyt polega na obniżeniu ciśnienia dociskającego (zasilania) i doprowadzeniu ciśnienia do komór 4. Ciśnienie to powoduje przesunięcie pierścieni w górę. Ruch pierścieni jest ograniczony wycięciami obudowy 2. Na tak rozsuniętych i wstępnie oczyszczonych pierścieniach można przeprowadzić dalsze zabiegi oczyszczania. Zaletami konstrukcji są: prosta budowa, łatwy demontaż, możliwość automatycznego czyszczenia i wstępnego „samoczyszczenia się” szczelin podczas demontażu. Do wad należą trudności w wykonaniu zespołu współśrodkowych pierścieni.

Kolmatomierz, przedstawiony na rys. 5.54c, składa się ze stołu płyt 1 z naciętymi rowkami. Płyty mają podcięcia na środkowej powierzchni na wymiar szczeliny, która tworzy się między powierzchnią zeszlifowania a płaską powierzchnią następnego nałożonej płyty. Położenie płyt względem siebie jest ustalone za pomocą dwóch płyt ustalających 2. Docisk zapewnia wywieranie ciś-



Rys. 5.55. Schemat ideowy analizatora kolmatacyjnego; 1 — fotodioda, 2, 6, 10 — obudowy, 3 — rurka statogometryczna, 4 — żarówka oświetlająca, 5 — zespół dociskowy, 7 — płyty ustalające, 8 — stół płyt ze szczelinami, 9 — nakrętka dociskająca, 11 — przepona z popychaczem, 12 — czujnik, 13 — wspornik

nienia zasilania na tłok 3 w cylindrze 5. Ruch powrotny tłoka zapewnia sprężyna zwrotna 4. Przekazywanie ciśnienia do zespołu czujników jest dokonywane przez otwory wiercone w powierzchni czołowej, doprowadzone pod rowkami na uszczelnienia do kanałów: doprowadzającego i odprowadzającego. Czyszczenie polega na demontażu stosu płyt i przemyciu każdej płyty osobno. Kolmatomierz umożliwia zmianę zakresów pomiarowych przez wymianę płyty ze stołu.

Schemat ideowy układu do mierzenia ilości zanieczyszczeń przy wykorzystaniu kolmatomierza wg rys. 5.54c przedstawiono na rys. 5.55. Układ taki składa się z kolmatomierza, zespołu czujników różnicy ciśnień oraz przepływomierza. Układ ten może przekazywać informacje do układu liczącego. Przepona czujnika różnicy ciśnień jest połączona z trzpieniem. Miarą różnicy ciśnień są jego przesunięcia. Trzpień może być np. zakończony rdzeniem cewki w obwodzie przetwornika. Przepływomierz umieszcza się na wyjściu z kolmatomierza, gdzie przepływ ma charakter kroplowy. Krople zliczone są za pomocą fotodiody. Wyjście z przepływomierza może być wprowadzone bezpośrednio do układu wzmacniającego bez przetwornika.

5.7.5. Przyrząd do określania wskaźnika kolmatacji (Silting Index)

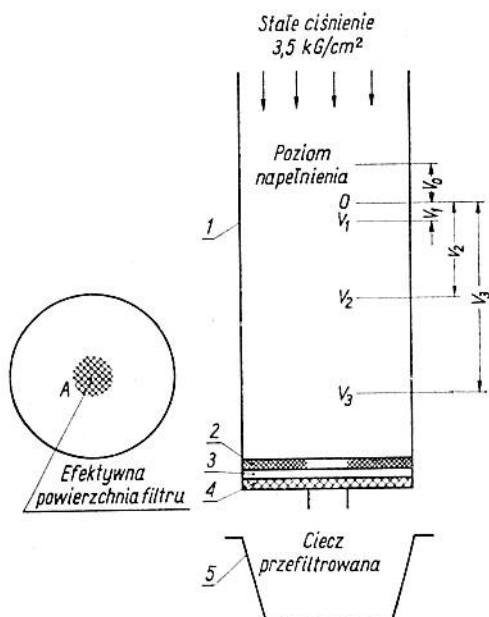
Przyrząd ten pokazano schematycznie na rys. 5.56. Pod odpowiednią kryzą 2 jest umieszczony filtr przeponowy 3 (np. 0,8 μm). Pod nim znajduje się siatka podtrzymująca 4. Do zbiornika 1 wlewa się określoną objętość (co najmniej 50 ml) badanej cieczy i na jej powierzchnię wywiera się stałe ciśnienie. Następnie mierzy się czas T_1 przejścia przez odsłoniętą powierzchnię błony 5 ml cieczy do zlewki 5, T_2 dla 25 ml ogółem i T_3 dla 50 ml ogółem. Wskaźnik kolmatacji określa się z wzoru

$$e_c = \frac{T_3 - 2T_2}{T_1} \quad (5.77)$$

Pierwsze 5 ml przetłoczonej cieczy stanowi pomiar lepkości cieczy. Zakłada się, że na tym etapie występuje tylko nieznaczne zatykanie błony. Jeśli występuje zatykanie, wówczas nie występuje czas T_3 i w wyniku otrzymuje się wskaźnik kolmatacji równy nieskończoności. (Szczegółowy opis czynności występujących podczas próby podano dalej w tym samym ustępie).

Wskaźnik kolmatacji został szczegółowo opisany w dwóch dokumentach: ASTM F52-65T (Amerykańskie Towarzystwo Prób i Materiałów) oraz 788 S.A.E. (Stowarzyszenie Inżynierów Przemysłu Samochodowego).

Normy te określają metody pomiarów wartości zamulania i skłonności do zamulania przez bardzo drobne cząstki i substancje galaretowate znajdujące się w cieczy. Skłonność do zamulania jest



Rys. 5.56. Schemat przyrządu do określania wskaźnika kolmatacji

wyrażona *wskaźnikiem kolmatacji*. Zasada pomiaru jest następująca. Badana ciecz jest przetłaczana przez filtr przeponowy o jednolitej wielkości porów 0,8 μm , przy stałej różnicy ciśnień. Cząstki zanieczyszczeń o wymiarach większych od 5 μm mają skłonność do tworzenia luźnych bryłek, natomiast cząstki mniejsze od 5 μm i substancje galaretowate blokują pory przepływowe filtra i powodują spadek natężenia przepływu. Spadek ten jest wyrażany *bezwymiarowym wskaźnikiem kolmatacji*. Im wyższy jest wskaźnik kolmatacji, tym większa skłonność cieczy do zamulania filtra (dla tej samej krzywej). Wyniki pomiarów są niezależne od lepkości i temperatury cieczy pod warunkiem, że lepkość i temperatura są stałe podczas eksperymentu. Pomiarów nie należy przeprowadzać przy silnym nasłonecznieniu ani w pobliżu źródeł ciepła, co mogłoby spowodować zmianę temperatury, a więc i lepkości cieczy. Przyrząd i próbka przed pomiarem powinny znajdować się w temperaturze pokojowej.

Aparatura pomiarowa zawiera następujące zespoły:

— przyrząd do określania wskaźnika kolmatacji (rys. 5.56) produkowany przez Millipore Filter Corp., Bedford, Mass. oraz Pall Corp. Glen Cove, L.I., N.Y.;

— zbiornik cieczy o określonych stosunkach objętości (rys. 5.56);

— kryza wymienna do określania wskaźnika kolmatacji; ze względu na różnorodność zanieczyszczeń zawartych w cieczach badanych powinny być do dyspozycji 4 wkładki — kryzy o rosnących otworach odpowiadających efektywnej powierzchni filtrowania; wymiarowanie kryz podano w tabl. 5.15;

Tablica 5.15. Wartości względne objętości i powierzchni kryz

$V_0/V_1 = 2/1$	V — objętość próbki A — powierzchnia efektywna filtru
$V_2/V_1 = 5/1$	
$V_3/V_1 = 10/1$	
$V_3/A_1 = 1,0 \cdot 10^4 \text{mm}^2$	dla kryzy nr 1
$V_3/A_2 = 2,33 \cdot 10^4 \text{mm}^2$	dla kryzy nr 2
$V_3/A_3 = 5,4 \cdot 10^4 \text{mm}^2$	dla kryzy nr 3
$V_3/A_4 = 1,25 \cdot 10^4 \text{mm}^2$	dla kryzy nr 4
$A_1/A_1 = 80/1$	
$A_3/A_1 = 18,5/1$	
$A_2/A_1 = 4,3/1$	

— źródło gazu o stałym ciśnieniu ($3,5 \text{ kG/cm}^2$);

— zawór kontrolny;

— podwójny sekundomierz umożliwiający niezależne włączenie i zatrzymywanie każdej sekcji (lub równoważny zestaw);

— szczytce;

— filtry przeponowe o wymiarach porów $0,8 \pm 0,05 \mu\text{m}$ spełniające wymagania normy ADTM E 128 dotyczącej określania maksymalnej średnicy porów i przepuszczalności sztywnych filtrów porowatych (tom 30); przepuszczających $225 \pm 15 \text{ ml}/(\text{min} \cdot \text{cm}^2)$ wody destylowanej pod ciśnieniem 700 mm Hg. Średnica filtrów powinna odpowiadać średnicy stosowanego przyrządu.

Przygotowanie przyrządu do pomiaru polega na tym, że przed każdą próbą przyrząd należy wycisnąć rozpuszczalnikiem właściwym dla badanej cieczy, a następnie po zmontowaniu dokonać próby szczelności przyrządu. Przy zamkniętym zaworze kontrolnym należy napełnić zbiornik przyrządu badaną cieczą i na okres 2 minut podłączyć pełne ciśnienie robocze $3,5 \text{ kG/cm}^2$. Jakikolwiek wycieki cieczy są niedopuszczalne, ponieważ wpływają w znacznym stopniu na wyniki pomiarów. Próba szczelności nie

musi być przeprowadzana przed każdym pomiarem, lecz dostatecznie często, aby upewnić się, że przyrząd nie przecieka. Po przeprowadzeniu próby szczelności aparat należy zdemontować zgodnie z instrukcją obsługi. Przy użyciu szczypiec założyć 0,8 μm filtr przeponowy na kryzę o odpowiedniej wielkości. Próbkę cieczy mieszać intensywnie przez 15 sekund przed każdym pomiarem. Dwukrotnie przepłukać zbiornik przyrządu. Przełączyć próbkę cieczy do zbiornika tak, aby poziom jej wypadł na wysokości kreski napełnienia przyrządu, a następnie założyć kryzę z filtrem.

Przebieg próby jest następujący:

Podłączyć ciśnienie 3,5 kG/cm^2 do zbiornika z cieczą. Przy próbach na terenie zakładów przemysłowych można stosować inne wartości ciśnienia, aby jednak wyniki były porównywalne, ciśnienie to musi być stałe. Następnie należy otworzyć zawór kontrolny i obserwując poziom cieczy w zbiorniku włączyć sekundomierz, gdy poziom cieczy pokryje się z kreską 0. Zmierzyć czas T_1 do momentu, gdy poziom cieczy pokryje się z kreską odpowiadającą objętości $V_1 = 5$ ml. Wynik zaokrąglić do najbliższej setnej części minuty. Jeżeli T_1 jest mniejsze od 0,10 min, należy ocenić wartość trzeciego miejsca po przecinku. Należy zmierzyć czas T_2 do momentu, gdy poziom cieczy pokryje się z kreską $V_2 = 25$ ml oraz czas $T_3 = 50$ ml do momentu, gdy poziom cieczy pokryje się z kreską V_3 . Z kolei należy obliczyć wskaźnik kolmatacji wg wzoru (5.77) i zapisać wynik z zaznaczeniem zastosowanej do pomiaru kryzy np.: $e_{c2} = 5,7$ (dla kryzy nr 2). Próba powinna być przeprowadzona 3 razy dla otrzymania ogólnego wskaźnika kolmatacji.

Wybór właściwej kryzy jest określony wymaganiem, aby spadek natężenia przepływu w czasie próby był znaczny, ale nie 100%-owy. Spadek natężenia jest zależny od zawartości w cieczy cząsteczek mniejszych od 5 μm i innych substancji galaretowatych. Jeżeli wskaźnik kolmatacji jest ujemny lub mniejszy od 0,10, wówczas pomiary należy przeprowadzić ponownie z użyciem następnej kryzy.

Na karcie pomiarów są notowane następujące dane: ciśnienie zasilania, objętość próbki i data, a dla każdego pomiaru w kolejnych rubrykach: T_1 , T_2 , T_3 , $2T_2$, $(T_3 - 2T_2) : T_1$, oraz wynik, tj. wartość wskaźnika kolmatacji i nr kryzy.

Metoda określania wskaźnika kolmatacji opisana powyżej nie jest porównywalna z innymi metodami. Istnieje tendencja do jej modernizacji w celu uzyskania wyników bardziej porównywalnych. Stosowane są najczęściej filtry o różnym stopniowaniu (gradacji) wymiarów porów.

Jeżeli w wyniku pomiaru z filtrem o określonej gradacji wartość wskaźnika kolmatacji przekroczy pewną ustaloną granicę, wówczas przeprowadza się następną próbę dla klasy wyższej, za-

kładając inny filtr o innej powierzchni i ponownie precyzuje się maksymalną wartość wskaźnika kolmatacji. Jeśli uzyskany wynik będzie mniejszy od pewnej ustalonej wartości, wówczas przeprowadza się próbę dla klasy niższej.

Istnieje wiele czynników, które ograniczają gradację i wielkość powierzchni filtru przeponowego, jaki powinien być wybrany. Najbardziej istotnymi czynnikami są:

— konieczność otrzymania T_1 w ustalonej mierzalnej wielkości,

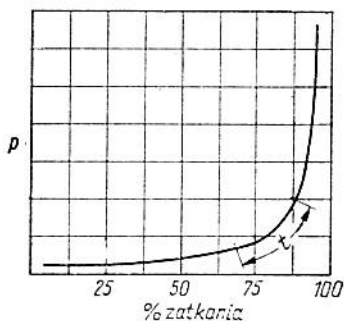
— konieczność uzyskania wielkości próbek cieczy w reprezentatywnym wymiarze,

— konieczność utrzymania ciśnienia na uzasadnionym poziomie.

Ustalenie wskaźników kolmatacji w odniesieniu do poziomów klas N.A.S.1638 może być osiągnięte tylko doświadczalnie. Stąd nasuwa się konieczność uzgodnienia liczby cząstek dopuszczalnej dla danego wymiaru filtru przeponowego.

Dotychczasowe badania wykazały, że za pomocą filtrów przeponowych ściśle kontrolowanej gradacji (1; 2 oraz 3 μm) można wyznaczyć z wystarczającą dokładnością klasy czystości N.A.S.1638 w zakresie od 5 do 10 włącznie.

Mając odpowiednią gradację filtrów przeponowych (0,8; 1,2 oraz 3 μm) specjalnie wyselekcjonowanych o ściśle kontrolowanym wymiarze porów i przepuszczalności, można sporządzić sprawdziany „przechodni — nieprzechodni” dla maksymalnego poziomu zanieczyszczeń wyszczególnionego w normie N.A.S. 1638 dla każdej klasy. Nie ma wówczas potrzeby porównywania klas czystości i wskaźnika kolmatacji. Dla każdej klasy można wyszczególnić gradację i powierzchnię filtru przeponowego, ciśnienie cieczy i maksymalny wskaźnik kolmatacji. Wskaźnik kolmatacji nie powinien wykroczać poza zakres 1÷3. Na rys. 5.57 pokazano typową krzy-



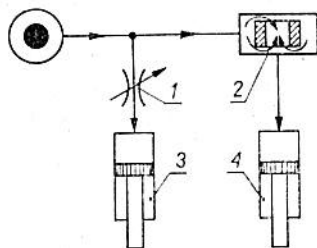
Rys. 5.57. Typowa krzywa kolmatacji dla filtru przeponowego przy stałym natężeniu przepływu

wą zatykania porów filtru przeponowego oraz odcinek t krzywej zalecany przy realizacji tej metody. Dla uproszczenia krzywa ta jest pokazana przy stałym przepływie i wzrastającym ciśnieniu. Z rys. 5.57 wynika, że przy $e_c > 3$ małe różnice w zanieczyszczeniu cieczy w bardzo wysokim stopniu wpływają na wartość wskaźnika kolmatacji, a przy $e_c < 1$ — w znacznie mniejszym.

Opisana wyżej metoda jest, jak dotąd hipotetyczna, gdyż na przeszkodzie stoi brak filtrów przeponowych o odpowiedniej gradacji i kontrolowanej przepuszczalności. Ponadto nie dokonano realnej próby ustalenia maksymalnych (dopuszczalnych) wartości wskaźnika kolmatacji.

5.7.6. Urządzenie sygnalizujące

Schemat urządzenia sygnalizującego (alarmującego) o przekroczeniu progu czystości pokazano na rys. 5.58. Urządzenia takie stosuje się w układach hydraulicznych w czasie eksploatacji. Dwa zawory są połączone równolegle. Jeden z nich jest nastawiony na



Rys. 5.58. Urządzenie alarmujące o przekroczeniu progu czystości

pewną wartość ogranicznikiem labiryntowym 1, a drugi starannie regulowaną szczeliną 2 (np. 5 μm). Wskutek spadku ciśnienia na labiryncie i w szczelinie lepkość oleju, a więc i temperatura nie będą wpływały na natężenie względnego przepływu czystego oleju przez oba elementy. Zarówno za labiryntem, jak i za szczeliną są umieszczone wyłączniki ciśnieniowe 3 i 4. Strumień za labiryntem przesuwają tłoczek wyłącznika 3 działający na czerwony sygnał, a strumień za szczeliną przesuwają tłoczek wyłącznika 4 działający na zielony sygnał. Jeżeli dana ilość cieczy przepłynie przez labirynt, to zanim taka sama ilość przepłynie przez szczelinę, pojawia się sygnał czerwony. Jeśli natomiast dana ilość cieczy przepłynie najpierw przez szczelinę, to pojawia się sygnał zielony. Odpowiedni mechanizm zapewnia, że gdy jeden wskaźnik wysunie się, to drugi już nie może się wysunąć. Wskaźnik cofa się w wyniku za-

działania dźwigni obciążonej sprężyną. Opisane urządzenie jest wyposażone dodatkowo w zespół elementów na ciecz do przepływkiwania szczeliny.

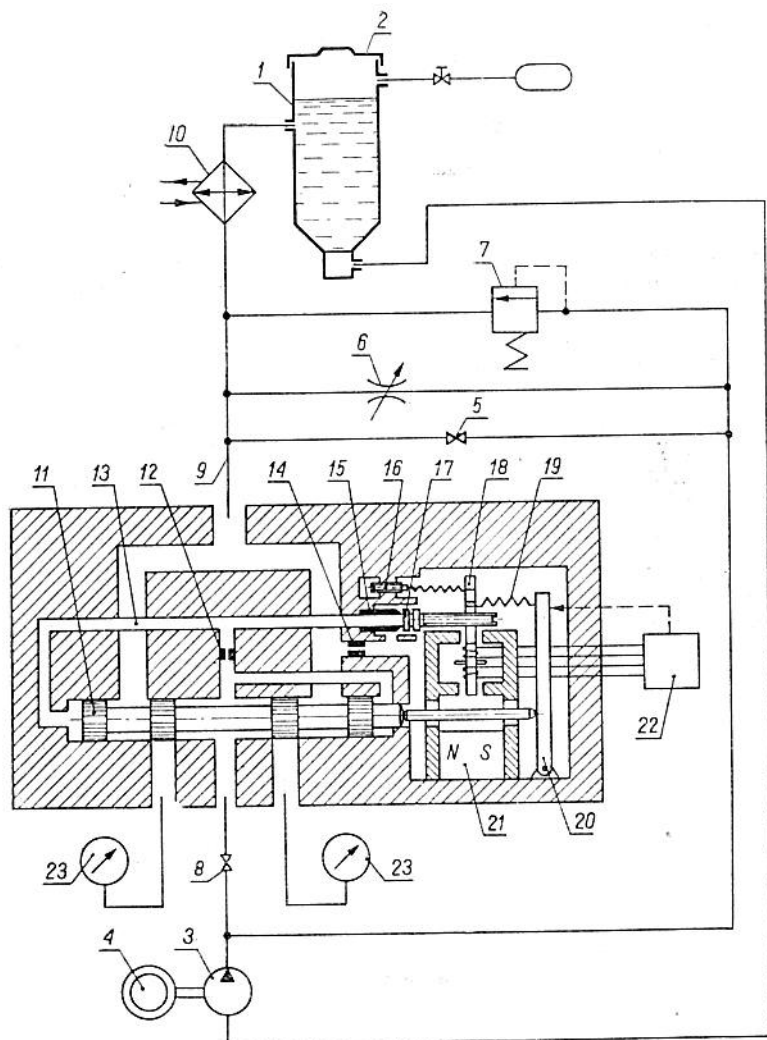
Przez określenie wysokości i długości szczeliny oraz natężenia przepływu przez labirynt, urządzenie może być nastawione na przyjmowanie lub odrzucanie żądanego pomiaru czystości. Eksperymentalne urządzenia są nastawione na poziomy 6 i 7 klasy N.A.S. 1638.

5.8. Metoda z wykorzystaniem wzmacniacza hydraulicznego

Stosowana w praktyce *ocena efektywności filtrowania wykonywana parametry układu hydraulicznego lub jego członów* polega na badaniu różnicy między działaniem urządzenia przy użyciu cieczy „idealnie” czystej i cieczy filtrowanej przez zainstalowany filtr. Różnica w wartościach wybranych parametrów testowych urządzeń hydraulicznych jest kryterium przydatności filtru. Najczęściej wykorzystywane są do takiej oceny wnioski z eksploatacji. Badane są na przykład takie parametry, jak spadek sprawności pompy zasilającej w czasie, stan powierzchni lub siły sterujące elementami suwakowych rozdzielaczy, intensywność niesprawności urządzenia, zmiana parametrów dynamicznych układu itd. Wnioski z takich badań nie dostarczają precyzyjnych informacji w odniesieniu do zalecanych charakterystyk filtrów, a jedynie umożliwiają ocenę skutków włączenia danego filtru. Urządzenia te mogą być stosowane tylko tam, gdzie niesprawność układu hydraulicznego nie wprowadza istotnego ryzyka.

Metodą umożliwiającą wyciągnięcie ilościowych wniosków dotyczących zanieczyszczeń cieczy roboczej układów hydraulicznych jest *metoda pomiaru histerezy wzmacniaczy hydraulicznych*. Metoda ta opiera się na założeniu potwierdzonym w praktyce, że wzmacniacze hydrauliczne są najbardziej czułe na zanieczyszczenia ze wszystkich elementów stosowanych w obwodach sterowania hydraulicznego. Dodatkowym argumentem jest fakt użycia „czujnika pomiarowego” w postaci produkcyjnego elementu układu, co umożliwia ocenę rzeczywistego wpływu zanieczyszczeń na jego działanie. Przykład wykorzystania wzmacniacza elektrohydraulicznego do pomiaru koncentracji zanieczyszczeń w cieczy roboczej, a przez to oceny efektywności stosowanych filtrów w układzie opisano po raz pierwszy w 1959 r. Jako elementu pomiarowego użyto wzmacniacza elektrohydraulicznego niesymetrycznego typu FC2 firmy Cadillac Gago Co., Detroit (USA) używanego w układach hydraulicznych firmy Boeing. Istota metody pomiaru

jest sprowadzona do cechowania wzmacniacza FC2 na specjalnie wyposażonym stoisku pomiarowym (rys. 5.59), na którym określona jest zależność histerezy w strefie nieczułości wzmacniacza (mA) od koncentracji wagowej zanieczyszczeń testowych ($\text{mg}/100 \text{ cm}^3$). Przez określenie wartości histerezy można na podstawie sporządzonego wykresu cechowania ustalić czy koncentra-



Rys. 5.59. Układ pomiarowy oceny czystości cieczy roboczych z wykorzystaniem wzmacniacza hydraulicznego

cja zanieczyszczeń zawiera się w zakresie dopuszczalnym. Cechowanie wzmacniacza FC2 dokonano przy użyciu zanieczyszczeń testowych o składzie: 95% zanieczyszczeń o wymiarach do 5 μm i 5% zanieczyszczeń o wymiarach od 5 do 50 μm , sporządzonych z mieszaniny w stosunku 1 : 1 pyłu i proszku żelaza karbonylkowego. Stwierdzono liniową zależność histerezy w funkcji koncentracji zanieczyszczeń w zakresie od 0,1 do 2,0 mg/100 cm^3 . Cechowanie wzmacniacza FC2 przebiega według następującego cyklu operacji. Po zamontowaniu układu pomiarowego (rys. 5.59) wprowadza się zanieczyszczenia testowe do czystej cieczy w zbiorniku 1 przy zdjętej hermetycznej pokrywie 2, a następnie miesza się przez przełączanie pompą 3 napędzaną silnikiem 4 wraz z jednoczesnym oddziaływaniem drgań ultradźwiękowych w celu przyspieszenia wymieszania i zmniejszenia zużycia pompy. Ciecz przepływa przez zawór bocznikujący 5 i ewentualnie przez zawory dławiące 6 i ograniczający ciśnienie 7 przy zamkniętym zaworze odcinającym 8 przewodem spływowym 9 przez wymiennik ciepła 10. Zawór bocznikujący o stałym przekroju 5 jest przeznaczony do ciągłego przepływu również i w czasie cechowania, w celu zapewnienia stałej koncentracji zanieczyszczeń w czasie pomiarów. Podczas cechowania jest otwarty zawór 8 i ciecz wypełnia wszystkie przestrzenie wewnętrzne wzmacniacza. Przy każdej koncentracji zanieczyszczeń jest możliwy pomiar histerezy bez uwzględnienia i z uwzględnieniem czasu. Ciecz pod ciśnieniem wpływa do szczelin między korpusem a suwakiem 11, przepływa przez opór wejściowy kaskady 12 do komory kaskady 13, przepływa przez szczelinę między dyszą 15 a przysłoną 17, przez przestrzenie silnika momentowego 21 i opór dławiący spływu 14 do przewodu spływowego 9. W stanie ustalonym suwak rozdzielczy 11 zajmuje położenie środkowe wyzerowane wkrętem 16 połączonym sprężyscie ze zworą 18 silnika momentowego i dźwignią sprzężenia zwrotnego 20 za pośrednictwem sprężyny 19, tak że istnieje równowaga ciśnień w przewodach połączonych z manometrem kontrolnym 23. Blok sterowania i pomiaru histerezy 22 w postaci panela elektronicznego i rejestratora jest przeznaczony do wprowadzenia sygnału sterującego do silnika momentowego 21 i rejestracji ruchu dźwigni sprzężenia zwrotnego 20, wyrażającego ruch suwaka rozdzielczego 11, wraz ze wskazaniem wartości prądu sygnału sterującego, przy którym ruch ten się zaczyna, będącego miarą histerezy wzmacniacza przy danej koncentracji zanieczyszczeń.

Dotychczas brak w literaturze pełnych opracowań teoretycznych dotyczących zmiany czułości wzmacniaczy hydraulicznych pod wpływem zanieczyszczeń zawartych w cieczach. Uniemożliwia to wyjaśnienie uzyskanych doświadczalnie prawidłowości.

Próbie oceny złożonych zjawisk wpływu zanieczyszczeń na działanie elementów hydraulicznych tego typu można dokonać przy wykorzystaniu teorii kolmatacji w szczelinach.

5.9. Metody izotopowe

Metody izotopowe należą do nowoczesnych metod badawczych, aczkolwiek ich praktyczne zastosowanie wiąże się z niezmiernie dużymi trudnościami. Metody izotopowe polegają na wprowadzeniu aktywowanych sztucznie zanieczyszczeń i przepuszczaniu ich przez filtr. Są one bardzo precyzyjne ze względu na dużą czułość. Przy dobrze zorganizowanym procesie badania cieczy roboczej można uzyskać wyniki w łatwy sposób sprawdzalne przez badanie aktywności wkładu filtracyjnego. Badania tego rodzaju były prowadzone i w Polsce. Stanowiły one podstawę do opracowania bardziej racjonalnej metody pomiaru. Wydaje się również, że w niedługim czasie metoda izotopowa znajdzie zastosowanie do badania efektywności filtrowania w powiązaniu z zużyciem części współpracujących ze sobą w układzie hydraulicznym.

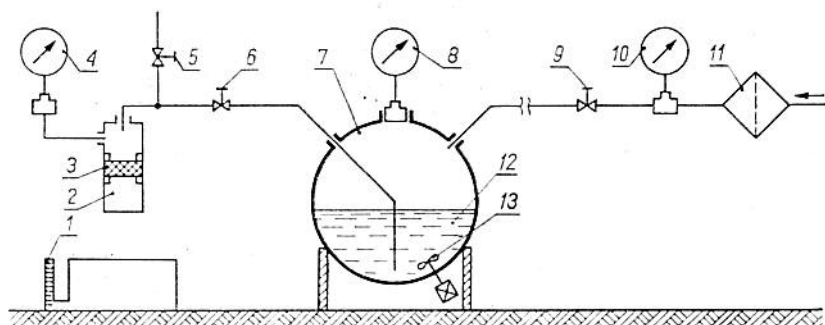
Badania izotopowe (*metoda atomów znaczonych*) umożliwiają określenie wielu parametrów filtracyjnych materiałów porowatych. W badaniach filtrów z zastosowaniem izotopów promieniotwórczych stawia się najczęściej następujące zadania:

- wyznaczenie efektywności filtrowania w zależności od grubości ścianki filtru (wybór najmniejszej dopuszczalnej grubości ścianki filtru o określonej wielkości porów ze względu na przepuszczanie zanieczyszczeń);
- wyznaczenie efektywności filtrowania w zależności od wielkości porów;
- wyznaczenie efektywności regeneracji filtrów;
- wyznaczenie stopnia zużywania się elementów układu i skuteczności oczyszczenia cieczy roboczej przez filtr z produktów zużycia układu.

Wyniki badań łącznie z innymi badaniami mają na celu wybór optymalnych parametrów konstrukcyjnych filtru, a więc umożliwiają one również obliczanie i dobór filtrów do określonego urządzenia płynowego.

Urządzenie do badania filtrów metodą izotopową powinno być wykonane specjalnie do pracy z zanieczyszczeniami radioaktywnymi lub też powinno być przystosowane do takiej pracy. Przykład budowy stoiska do badania próbek metalowych filtrów spiekanych przedstawiono na rys. 5.60.

Metoda badania zawiera wiele czynności specyficznych tylko w badaniach z zastosowaniem izotopów. Pierwszą i najważniejszą czynnością jest wybór radioizotopów, stanowiących zanieczyszczenia testowe „znanzone”. Opis metody jest dokonany na przykładzie przeprowadzonych badań.



Rys. 5.60. Schemat stoiska do badań filtrów cieczy metodą izotopową; 1 — zbiornik cieczy przefiltrowanej, 2 — komora filtracyjna, 3 — badany element filtracyjny, 4, 8, 10 — manometry w komorze filtracyjnej w zbiorniku gazu i na wlocie gazu, 5 — zawór odcinający probierczy, 6 — zawór zapasowy, 7 — zbiornik ciśnieniowy, 9 — zawór redukcyjny, 11 — filtr gazu, 12 — ciecz zanieczyszczona, 13 — mieszanio

Olej zanieczyszczono proszkiem tlenku glinu Al_2O_3 o różnych wymiarach ziarn (od 0 do 20 μm i od 0 do 60 μm). Według danych proszek tlenku glinu miał następujący skład chemiczny 1) proszek tlenku glinu o ziarnistości do 20 μm ; Al_2O_3 — 99,46%, K_2O i Na_2O — 0,49%, Fe_2O_3 — 0,03%, SiO_2 — 0,009%, MnO — 0,0007%, domieszki Co, Cu, Zn, Pb;

2) proszek tlenku glinu o ziarnistości do 60 μm : Al_2O_3 — 98,64%, SiO_2 — 0,426%, Fe_2O_3 — 0,428%, MgO — 0,0015%, Na_2O — 0,040%, domieszki Co, Cu, Zn, Pb.

Tlenek glinu w ściśle odważonej ilości aktywowano w reaktorze atomowym. W wyniku napromieniowania tlenku glinu, zawierającego wyżej wymienione domieszki, powstaje grupa radioizotopów o różnych własnościach jądrowych, a więc o różnym okresie połowicznego zaniku $T_{1/2}$ i energii promieniowania E_β i E_γ . Powstające radioizotopy przeważnie charakteryzują się krótkim okresem połowicznego zaniku z wyjątkiem ^{55}Fe ; ^{59}Fe ; ^{60}Co . Okres połowicznego zaniku $T_{1/2}$ takich izotopów jak ^{24}Na , ^{64}Cu i ^{56}Mn wynosi kilka lub kilkadziesiąt godzin. Z tego też względu poprawkę na rozpad promieniotwórczy tej mieszaniny należy wyznaczyć na podstawie pomiarów wzorca.

Pomiary efektywności filtrowania polegają na mierzeniu aktywności oleju zawierającego proszek Al_2O_3 znaczonego radioizotopami przed i za filtrem (w impulsach na minutę).

Orientacyjną aktywność 1 grama zanieczyszczeń, niezbędną do przeprowadzenia pomiarów, obliczono na podstawie wzoru

$$a = \frac{\kappa I_t V_c}{22,2 \cdot 10^8 \varepsilon_w m_1 V_p} \text{ mCi/g} \quad (5.78)$$

gdzie: κ — współczynnik (przyjęto $\kappa = 200$), I_t — szybkość liczenia tła w imp/min, ($I_t = 150$ imp/min dla przyjętego układu pomiarowego), V_c — objętość oleju przypadająca na 2 gramy zanieczyszczeń ($V_c = 1000$ ml), V_p — objętość próbki oleju ($V_p = 50 \div 100$ ml), ε_w — efektywność liczenia impulsów ($\varepsilon_w = 0,12$ na podstawie pomiarów), m_1 — masa aktywnych zanieczyszczeń ($m_1 = 0,1$ g, gdzie $m = 2$ gramy).

Podstawiając do wzoru przyjęte wielkości otrzymamy $a = 0,006$ mCi/g. Tak więc aktywność cieczy zanieczyszczonej powinna wynosić 0,006 mCi na 1 litr oleju. Aktywność oleju będzie znacznie mniejsza po przepuszczeniu go przez filtr, gdyż zatrzyma on znaczną część zanieczyszczeń. Dlatego przyjęto współczynnik $\kappa = 200$, gdy normalnie przyjmuje się $\kappa = 5 \div 10$. Obliczaną aktywnością charakteryzują się głównie radioizotopy ^{55}Fe , ^{59}Fe oraz ^{60}Co , gdyż pozostałe mają krótki okres połowicznego zaniku i aktywność ich będzie szybko wygasać. Zgodnie z obliczeniami tlenek glinu Al_2O_3 aktywowano w strumieniu $\Phi = 10^{13} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ w czasie $t = 0,5$ h. Po czasie schładzania $t = 10$ h aktywność 1 grama Al_2O_3 wynosiła około 0,45 mCi/g. Podczas przeprowadzania krótkotrwałych badań, aktywność ta jest znacznie wyższa od obliczonej. Oczywiście fakt ten nie może wpłynąć ujemnie na pomiary, gdyż im większa jest aktywność próbek, tym są one dokładniejsze. Czas aktywacji potrzebny w celu uzyskania odpowiedniej aktywności przy założonych warunkach aktywacji można obliczyć ze wzoru

$$a = \frac{0,6 \sigma \Phi C_i c}{3,7 \cdot 10^7 A} (1 - e^{-\lambda t}) \text{ mCi/g} \quad (5.79)$$

gdzie: Φ — wielkość strumienia neutronów $\text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, σ — izotopowy przekrój czynny (barn), C_i — zawartość danego izotopu w mieszaninie naturalnej izotopów pierwiastka, c — zawartość pierwiastka w materiale (wyrażona liczbą ułamkową), A — liczba masowa danego izotopu, t — czas aktywacji, $\lambda = \frac{0,693}{T}$ — stała rozpadu.

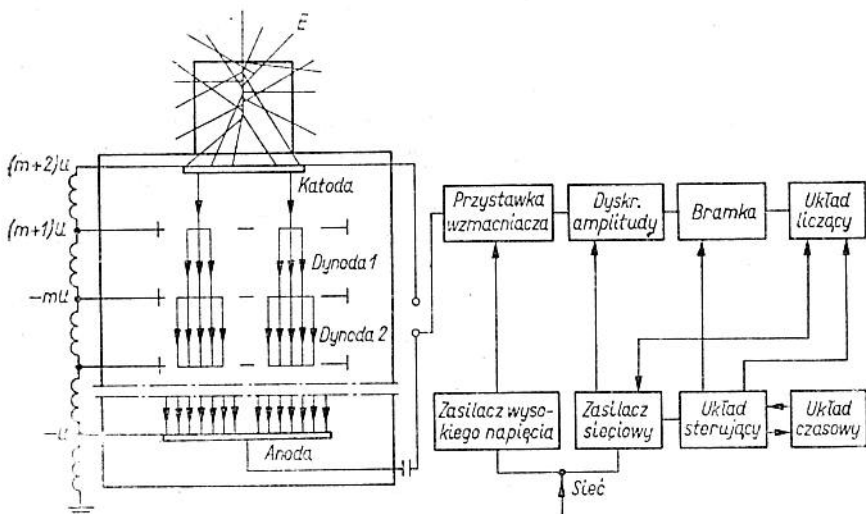
Posługiwanie się tym wzorem jest bardzo pracochłonne i niewygodne, jeśli na aktywność próbek składa się aktywność kilku radioizotopów. Dlatego też przy obliczeniach wygodniej posługiwać się tablicą.

Proszek Al_2O_3 znaczonej radioizotopami został wsypany w odpowiedniej ilości do oleju i dokładnie wymieszany. Aktywność oleju zawierającego radioaktywny proszek mierzono przed i po przejściu przez filtr. *Efektywność (współczynnik) filtrowania*

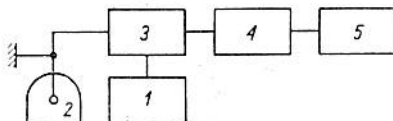
$$e_f = \frac{\bar{I}_1 - \bar{I}_2}{\bar{I}_1} 100\% \quad (5.80)$$

gdzie: \bar{I}_1 — średnia prędkość liczenia impulsów próbki oleju przed filtrem w imp./min, \bar{I}_2 — średnia prędkość liczenia impulsów próbki oleju po przejściu oleju przez filtr w imp./min.

Na 1 litr oleju wsypano około $0,3 \div 0,5$ proszku Al_2O_3 znaczonego radioizotopami. W celu zapewnienia dokładności pomiaru pobierano do pomiarów po 10 próbek oleju przed i za filtrem. Objętość próbek oleju wynosiła 100 ml. Aktywność próbek oleju mierzono za pomocą licznika scyntylacyjnego. Na rys. 5.61 pokazano schemat blokowy aparatury zastosowanej do badań. Mierzono rów-



Rys. 5.61. Schemat blokowy aparatury do badań izotopowych



Rys. 5.62. Schemat blokowy aparatury; 1 — zasilacz wysokiego napięcia, 2 — licznik G-M, 3 — wzornik katodowy, 4 — blok formowania impulsów (multiwibratory), 5 — przelicznik lub integrator

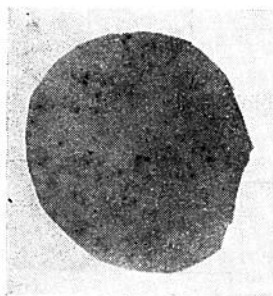
niez aktywność filtru po wymontowaniu go z układu. Pomiar aktywności filtru miały na celu określenie efektywności jego regeneracji. Filtr przemywano rozpuszczalnikiem i następnie powtórnie mierzono jego aktywność. Pomiar wykonywano licznikiem sztorcowym G-M. Schemat blokowy aparatury przedstawiono na rys. 5.62. Współczynnik regeneracji filtru e_r obliczano ze wzoru

$$e_r = \frac{I_1 - I_2}{I_1} 100\% \quad (5.81)$$

gdzie: I_1 — aktywność filtru przed oczyszczeniem w imp/min, I_2 — aktywność filtru po oczyszczeniu w imp/min.

W celu skontrolowania pomiarów mierzono również aktywność rozpuszczalnika po przemyciu filtru. Próbka rozpuszczalnika miała tę samą objętość co próbka oleju i była mierzona w tych samych warunkach.

Dla określenia wpływu takich parametrów konstrukcyjnych, jak kształt, grubość filtru itp., należy określić rozkład zanieczyszczeń na powierzchni oraz na jego przekroju poprzecznym. Umożliwia to zastosowanie metody autoradiograficznej. W tym celu należy w filtrze utrwalić zanieczyszczenia przez zalanie go żywicą epoksydową, która nasiąkając w pory, umiejscowi i utrwali zatrzymane zanieczyszczenia znaczone radioizotopami. Dla określenia rozkładu zanieczyszczeń w przekroju poprzecznym filtru, należy po wyschnięciu żywicy filtr poprzecznie przeciąć i wykonać szlif metalograficzny. Filtry od strony szlif przyłożono do błony fotograficznej przeznaczonej do autoradiografii. Całość umieszczono w zamkniętej światłoszczelnej kasecie. Cząstki β wysyłane przez zanieczyszczenia padając na emulsję dają obraz autoradiograficzny (autoradiogram) rozkładu zanieczyszczeń w badanym filtrze (rys. 5.63).

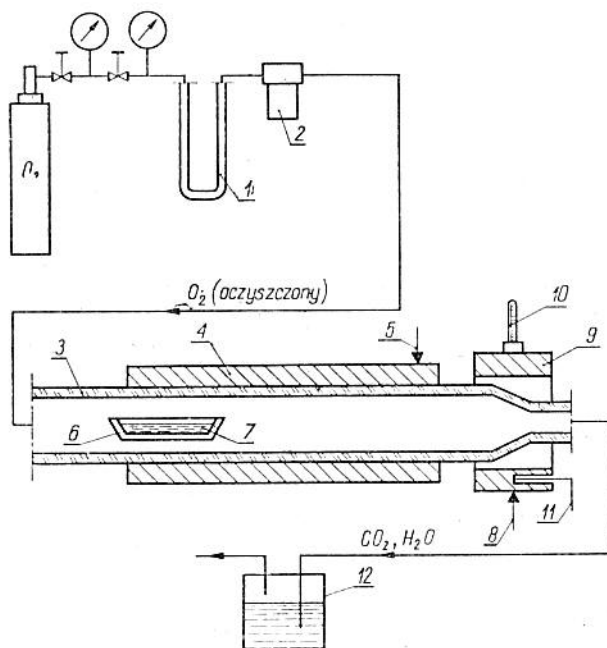


Rys. 5.63. Fragment obrazu autoradiograficznego rozkładu zanieczyszczeń w przekroju poprzecznym metalowego filtru spiekane

5.10. Spektrochemiczna metoda oznaczania zanieczyszczeń

Spektrochemiczna metoda oznaczania zanieczyszczeń umożliwia określenie składu chemicznego zanieczyszczeń. Jedną z ważnych zalet tej metody jest duża wykrywalność oraz duża szybkość oznaczenia w porównaniu z metodami analiz chemicznych. Przejawia się to głównie w tym, że jest możliwe jednoczesne oznaczenie kilku, a nawet kilkunastu pierwiastków z grupy metali (wykrywalność pierwiastków z grup niemetali jest na ogół mniejsza).

Spektralna analiza ilościowa ma charakter porównawczy (z krzywej zależności zaciemnienia linii analitycznej od stężenia oznaczanego pierwiastka w próbkach wzorcowych, wyznacza się jego stężenie w badanej próbce), stąd też ogromny wpływ na wyniki badań ma sposób przygotowywania zarówno wzorców jak i próbek. Szczególnie wówczas, gdy właściwą analizę poprzedza wstępne wzbogacenie próbek.



Rys. 5.64. Układ do spalania próbek oleju; 1 — odwadniacz zawierający żel krzemiankowy, 2 — filtr, 3 — rura kwarcowa, 4 — element grzejny (drut kantalowy w ceramice), 5 — doprowadzenie elektryczne do grzania, 6 — naczynie kwarcowe, 7 — próbka oleju, 8 — zasilanie termostatu, 9 — korpus termostatu, 10 — termometr, 11 — termopara, 12 — absorbent gazów spalinyowych (NaOH)

W przypadku analizy substancji organicznych jest konieczne usunięcie nośnika, który ze względu na różnice w składzie strukturalnym pogarsza wyniki ilościowe. W tym celu spala się próbkę w piecu kwarcowym (rys. 5.64), a otrzymany popiół analizuje się jak próbki proszkowe. Taki tok postępowania umożliwia dokładne uśrednienie próbki z zanieczyszczeniami metalowymi w badanym oleju.

Przedstawiony sposób postępowania umożliwia oznaczenie ilościowe w oleju mineralnym zanieczyszczeń powstałych z następujących metali: Al, Cr, Ag, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Ti, Sn, Pb. Opracowana metoda nie nadaje się do oznaczania wymienionych zanieczyszczeń w olejach silikonowych, ponieważ w ten sposób nie można usunąć krzemu powodującego zaczernienie tła i osłabienie linii spektralnych analizowanych pierwiastków. Usunięcie krzemionki wymaga odmiennego przygotowania preparatu i jest o wiele bardziej kłopotliwe.

Część doświadczalna metody obejmuje przygotowanie wzorców i próbek do analizy, przygotowanie elektrod, rejestrację widma, obróbkę kliszy, pomiary fotometryczne i opracowanie wyników. Przedstawiony opis postępowania opiera się na przeprowadzonych badaniach z wykorzystaniem typowej aparatury i konkretnych parametrów tej metody.

Przygotowanie wzorców. Wzorce spektrograficzne przygotowano na nośniku z proszku grafitowego wychodząc z tlenków oznaczanych metali. Mieszaninę podstawową (I) zawierającą 1% oznaczanych pierwiastków przygotowano przez uśrednienie: 37,7 mg Al_2O_3 ; 29,2 mg Cr_2O_3 ; 21,5 mg Ag_2O ; 25,0 mg CuO ; 28,6 mg Fe_2O_3 ; 33,0 mg MgO ; 27,7 mg MnO_4 ; 25,4 mg NiO ; 33,3 mg TiO_2 ; 25,4 mg F_2O_2 ; 23,1 mg PbO_2 oraz 1691 mg proszku grafitowego z dodatkiem 100 mg NaCl i 4 mg $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$. Alkohol odparowano w temperaturze $60\div 70^\circ\text{C}$ pod promiennikiem podczerwieni. Po utarciu w moździerzu agatowym (około 0,5 godziny), wzorce przechowuje się w pudełku z polistyrenu.

Kolejne wzorce z mieszaniny I otrzymuje się przez jej rozcieńczenie proszkiem grafitowym z 5% dodatkiem NaCl (tabl. 5.16). Nośnik spektralny NaCl ma na celu osłabienie widma ciągłego, zwiększenie frakcyjnej destylacji zanieczyszczeń oraz osłabienie wzbudzenia linii spektralnych atomów o wysokim potencjale wzbudzenia przy wzmożonej intensywności ich linii rezonansowych.

Przygotowanie próbki do analizy. Tygielek kwarcowy z próbką o znanej masie oleju i proszku grafitowego RW-S umieszcza się w piecu kwarcowym (rys. 5.64) i spala w strumieniu tlenu w temperaturze 400°C w ciągu ok. 6 godzin. Otrzymujemy koncentrat zanieczyszczeń metalowych (w postaci tlenków) na nośni-

Tablica 5.16. Przygotowanie zawartości pierwiastka we wzorcu

Nr wzorca	Zawartość pierwiastka w mieszaninie wyjściowej %	Ilość mieszaniny wyjściowej mg	Ilość proszku grafitowego z 5% NaCl mg	Zawartość pierwiastka we wzorcu %
2	1	200	1800	$1 \cdot 10^{-1}$
3	$1 \cdot 10^{-1}$	200	1800	$1 \cdot 10^{-2}$
4	$1 \cdot 10^{-2}$	600	1400	$3 \cdot 10^{-3}$
5	$1 \cdot 10^{-2}$	200	1800	$1 \cdot 10^{-3}$
6	$3 \cdot 10^{-3}$	200	1800	$3 \cdot 10^{-4}$
7	$1 \cdot 10^{-3}$	200	1800	$1 \cdot 10^{-4}$
8	$3 \cdot 10^{-4}$	200	1800	$3 \cdot 10^{-5}$
9	$1 \cdot 10^{-4}$	200	1800	$1 \cdot 10^{-5}$

ku grafitowym. Następnie dodajemy nośnika i dokładnie uśredniamy.

Równocześnie z przygotowaniem próbek przygotowujemy „ślepa próbę” zawierającą tylko proszek grafitowy.

Przygotowanie elektrod. W kraterkach wstępnie przedpalonych elektrod (łuk prądu stałego $I = 8$ A, $U = 220$ V) $4,5 \times 4$ mm umieszcza się 20 — miligramowe odważki „ślepej roboty”, próbki i wzorców. Na jedną kliszę przygotowuje się po 3 elektrody ze „ślepa próbą”, 3 elektrody z każdą próbką i po 3 elektrody z pięcioma wzorcami. Wzorce dobiera się w zależności od poziomu zanieczyszczeń próbki badanego oleju, z uwzględnieniem współczynnika wzbogacenia zanieczyszczeń podczas przygotowywania próbki. Współczynnik wzbogacenia zanieczyszczeń

$$A = m_1/m_2 \quad (5.82)$$

gdzie: m_1 — masa próbki, m_2 — masa proszku grafitowego.

Rejestracja widma oraz obróbka kliszy. Stosowana aparatura do rejestracji widma i warunki wzbudzenia:

- spektrograf siatkowy PGS-2,
- generator DG-2 z przystawką na łuk prądu stałego,
- osłabiacz trzystopniowy,
- szczelina spektrografu $17 \mu\text{m}$,
- środkowa soczewka na pełnym otworze,
- przerwa analityczna 2 mm,
- czas naświetlania 30 s (optymalny czas naświetlania ustala się na podstawie krzywych destylacji frakcyjnej wyznaczonych z wzorca zawierającego 10^{-3} % oznaczanych pierwiastków),
- klisza „blau hart”, ORWO,
- wywoływacz metylohydrochinonowy (1 g metolu), 26 g siarczynu sodu, 5 g hydrochinonu, 22 g węglanu sodu, 1 g bromku potasu w 1 litrze wody),

- czas utrwalania 2 min,
- utrwalacz zwykły (tiosiarczan sodu, pirosiarczyn sodu, woda).

Pomiary fotometryczne. Na podstawie próbek wzorcowych o znanym składzie chemicznym wyznacza się zależność zaczernienia (s) linii analitycznej od stężenia pierwiastka (c) w próbce wzorcowej. Z tak otrzymanej krzywej analitycznej w układzie $s = f(\lg c)$, znając zaczernienie oznaczanego pierwiastka w próbce odczytujemy jego stężenie (tabl. 5.17).

Opracowanie wyników badań. Odczytane stężenie z wykresu analitycznego przelicza się na zawartość oznaczanego pierwiastka w próbce wg wzoru

$$X = \frac{m(a-b)}{d} \quad (5.83)$$

gdzie: m — odważka proszku grafitowego w g, d — odważka próbki oleju w g, a — stężenie oznaczanego pierwiastka w próbce, b — stężenie oznaczanego pierwiastka w „ślepej próbce”.

Granice oznaczalności w próbkach zależą od współczynnika wzbogacenia A . Na przykład dla $A = 100$ wykrywalność oznaczanych pierwiastków jest o dwa rzędy wielkości niższa. W tabl. 5.18 podano granice oznaczalności pierwiastków we wzorcach.

W tabl. 5.19 podano wyniki badań zanieczyszczeń metalicznych w oleju Hydrol 30 na podstawie próbek pobranych z laboratoryjnego stoiska hydraulicznego przed i za filtrem o nominalnej dokładności filtrowania $15 \mu\text{m}$ zainstalowanego w linii tłocznej z pompą zębatą. Inne możliwe do określenia pierwiastki znajdują się w ilościach mniejszych od granic ich oznaczalności.

Na dokładność wyników badań, oprócz właściwie przeprowadzonej analizy laboratoryjnej, wpływa sposób pobierania próbek oleju. Zastosowanie zwykłych zaworów zaporowych z elementami dławiącymi może wprowadzić bardzo poważne zniekształcenie wyników wskutek przedostania się do układu produktów ściernych podczas otwierania zaworu. Należy stosować zawory probiercze specjalnej konstrukcji.

Metodę spektrochemiczną oznaczania zanieczyszczeń można stosować do analizy pierwiastków metalicznych zawartych w gazach roboczych. Pobieranie próbek odbywa się najczęściej w układzie pod ciśnieniem (lub na ssaniu gazu). Zanieczyszczenia są zbierane na powierzchni filtru bibułowego z jednoczesnym pomiarem objętości przefiltrowanego gazu lub pomiarem natężenia przepływu i czasu filtrowania. Filtr z osadem spala się w piecu, a otrzymany popiół analizuje się jak próbki proszkowe.

Tablica 5.17. Wyniki pomiarów fotometrycznych

Lp.	Oznaczenia pierwiastek	Linia analityczna Å	Stopień osłabiania %	Warunki pomiaru
1	Al	3082,2	50	Mikrofotometr MF-2, szczelina - 0,22 mm skala S
2	Cr	2835,6	100	
3	Ag	3280,7	10	
4	Cu	3274,0	10	
5	Fe	3020,6	10	
6	Mg	2779,8	50	
7	Mn	2801,1	10	
8	Ni	3050,8	100	
9	Ti	3088,0	100	
10	Sn	2840,0	50	
11	Pb	2802,0	10	

Tablica 5.18. Granice oznaczalności pierwiastków we wzorach

Al	Cr	Ag	Cu	Fe	Mg
$1 \cdot 10^{-4}\%$	$1 \cdot 10^{-3}\%$	$1 \cdot 10^{-3}\%$	$1 \cdot 10^{-3}\%$	$1 \cdot 10^{-10}\%$	$1 \cdot 10^{-4}\%$
Mn	Ni	Ti	Sn	Pb	
$3 \cdot 10^{-5}\%$	$1 \cdot 10^{-3}\%$	$1 \cdot 10^{-3}\%$	$1 \cdot 10^{-1}\%$	$3 \cdot 10^{-5}\%$	

Tablica 5.19. Wyniki badań spektrochemicznych zanieczyszczeń oleju mineralnego Hydrol 30

Miejsce pobrania próbki oleju	Zawartość w % (wagowo) zanieczyszczeń metalicznych							
	Fe	Mn	Pb	Al	Cu	Sn	Cr	Ni
Przed filtrem	$8 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$< 1 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$
Za filtrem 15 µm	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$< 1 \cdot 10^{-6}$	$< 1 \cdot 10^{-5}$	$< 1 \cdot 10^{-5}$

Rozdział 6. OBLICZENIA I BADANIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE FILTRÓW

6.1. Uwagi wstępne

Filtrowanie płynów przy zastosowaniu przegród porowatych wymaga rozwiązania pod względem konstrukcyjnym wielu poważnych zagadnień. Jednym z takich zagadnień jest wybór kształtu wkładu uzależniony przede wszystkim od przyjętych natężeń przepływu oraz spadków ciśnień. W filtrach wysokociśnieniowych wykonanych ze spieków metalowych (ciśnienie zasilania $350 \div 1200$ kG/cm²) oraz filtrach dokładnego i bardzo dokładnego oczyszczania dopuszcza się niekiedy spadki ciśnień dochodzące do ok. $30 \div 70$ kG/cm². Jeżeli obciążenie wkładu takim spadkiem ciśnienia jest krótkotrwałe i występujące nie często w czasie pracy, to wkład nawet o słabszej konstrukcji może je wytrzymać i nie ulec zniszczeniu, natomiast w przypadku dopuszczenia trwałych obciążeń dużymi spadkami ciśnień należy konstrukcję wkładu przystosować do tego typu pracy. W przypadku filtrów wysokociśnieniowych dokładnego oczyszczania, przeznaczonych do filtrowania cieczy o dużych natężeniach przepływu, zaczyna odgrywać rolę minimalizacja objętości filtrów przy dużej powierzchni filtrującej i wysokiej niezawodności eksploatacyjnej filtrów.

Spełnienie powyższych warunków jest jak dotychczas realizowane w wyniku eksperymentalnego doboru kształtu i wymiarów zapewniających taką wytrzymałość, aby nie zaistniała obawa awarii w czasie pracy. Ten kierunek prac konstrukcyjnych i doświadczeń eksploatacyjnych, aczkolwiek zapewnia uzyskanie doskonałych konstrukcji przez przodujące firmy światowe specjalizujące się w produkcji filtrów, to jednak w wielu krajach, ze względu na ograniczone możliwości eksperymentowania w szerokim zakresie i brak tradycji w tej dziedzinie produkcji, jest konieczne prowadzenie wnikliwych rozważań teoretycznych i na tej podstawie wyciąganie wniosków dotyczących zaleceń w zakresie projektowania rozwiązań konstrukcyjnych zmniejszających znacznie ryzyko niepowodzeń przy ich zastosowaniu w praktyce. Rozważania teore-

tyczne, obliczenia oraz badania laboratoryjne próbek materiałów, z których są budowane wkłady filtracyjne umożliwiają wyciągnięcie wniosków niezbędnych w dalszych pracach konstrukcyjnych nad filtrami wysokiej dokładności, przystosowanymi do pracy w urządzeniach wysokociśnieniowych.

Jednym z najbardziej rozpowszechnionych kształtów wkładów jest kształt w postaci płyt połączonych za pośrednictwem podpór. Odległość między tymi płytami powinna wynosić ok. 1 do 3 mm, zależnie od wymiarów płyty i projektowanego natężenia przepływu. Najczęściej już w procesie wytworzenia płyt są wykonywane podpory słupkowe na wewnętrznej części segmentu podwójnego wkładu, albo też przez odizolowanie w montażu płyt elementami metalowymi lub z tworzywa sztucznego o takiej konstrukcji aby zapewniała przepływ oraz nie zmniejszała efektywnej powierzchni filtrującej. Obrzeża płyt segmentu są zgrzewane lub włączane w dodatkowy element szczelnie zaciskający bądź też lutowane. Klejenie płyt segmentu w wielu przypadkach jest mniej korzystne ze względu na możliwość uszkodzenia połączenia wskutek małej wytrzymałości i ruchów powierzchni filtrującej segmentu przy przepływie wynikających z niejednorodności materiału oraz odkształceń sprężystych. Za podstawową zasadę przyjmuje się taki sposób pracy wkładu, aby w wyniku różnicy ciśnień powstawały naprężenia ściskające materiał przegrody filtrującej.

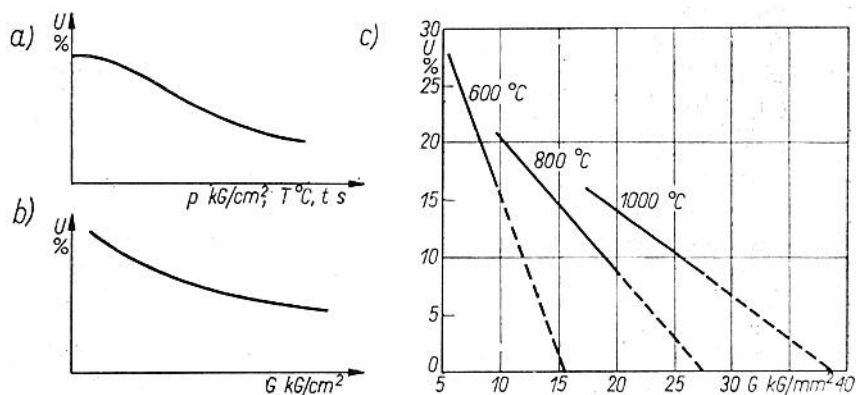
Drugim korzystnym kształtem wkładu filtracyjnego są cylindry o małej średnicy zewnętrznej i dowolnej długości. W tym przypadku rozkład naprężeń w materiale filtrującym jest bardzo korzystny (naprężenia ściskające) oraz jest zmniejszony całkowity spadek ciśnienia wskutek małej powierzchni wkładu. W porównaniu z wkładem w postaci płaskiej płyty (np. talerzowej) wkłady cylindryczne (nazywane również rurowymi lub świecowymi) pracują mniej korzystnie ponieważ konstrukcyjnie nie są w nich kompensowane siły. We wkładach płytowych, w których występuje pewnego rodzaju kompensacja hydrodynamiczna tzn. spadek ciśnienia na segmencie działa w przeciwnych kierunkach i obciąża głównie podpory, przy dużej ilości podpór odkształcenie trwałe wkładu jest praktycznie niemożliwe. Uzyskanie filtrów cylindrycznych o dużej wytrzymałości jest możliwe w przypadku stosowania cylindrów o małych średnicach. Wykonywanie takich filtrów przy zastosowaniu form do spiekania sprawia znaczne trudności. Możliwe jest wykonywanie cylindrycznych filtrów z taśmy skręconej i np. lutowanej, ale to podraża koszty produkcji. O ile filtry z wkładami cylindrycznymi można łatwo obliczyć wytrzymałościowo ze względu na istniejące w dostatecznie szerokim zakresie wyniki analiz teoretycznych i praktycznych, o tyle wkłady

z segmentami płytowymi ze względu na występowanie podpór wymagają indywidualnych na ogół rozważań. Dlatego też w tym rozdziale omówiono to zagadnienie dość szczegółowo. Ponadto, ze względu na powszechność zastosowania w filtrach wysokociśnieniowych wkładów filtracyjnych wykonanych z proszków spiekanych zagadnienia wytrzymałości odniesiono głównie do takich właśnie materiałów.

6.2. Wpływ technologii na własności mechaniczne spieków porowatych

Materiały wykonywane przy zastosowaniu metod metalurgii proszków i stosowane na wkłady filtrujące wykazują znaczną plastyczność. Wpływa to na zmniejszenie koncentracji naprężeń, a jednocześnie obecność porów powoduje zmniejszenie rzeczywistego przekroju materiału oraz powstanie niejednorodnego rozkładu naprężeń przy obciążeniu różnicą ciśnień podczas przepływu płynu filtrowanego. Niejednorodność rozkładu naprężeń w objętości materiału filtracyjnego jest spowodowana również niepełnym kontaktem między cząstkami, różnicą własności sprężystych cząstek itp.

Warunki technologii wykonania metalowych filtrów spiekanych wpływają na porowatość wkładu filtracyjnego w ten sposób, że zmniejszenie ciśnienia prasowania, zmniejszenie temperatury i czasu spiekania powodują zwiększanie porowatości (rys. 6.1a).



Rys. 6.1. a) Wpływ warunków spiekania na porowatość filtra, b) wytrzymałość spieku w zależności od porowatości, c) wpływ temperatury spiekania i porowatości na wytrzymałość spieku

Duża porowatość (powyżej 30%) zapewnia zmniejszenie oporów przepływu ale jednocześnie powoduje zmniejszanie wytrzymałości wkładu (rys. 6.1b). Niezależnie od tego można zwiększyć wytrzymałość wkładu przez odpowiedni dobór składu chemicznego materiałów wyjściowych, kształtu ziaren proszku oraz warunków prowadzenia procesu technologicznego.

Na rys. 6.1c przedstawiono zależność wytrzymałości od porowatości przy różnych temperaturach spiekania dla filtrów z proszku miedzi. Przedstawione wyniki wskazują na liniową zależność między porowatością a wytrzymałością, zaś aproksymacja tej zależności do porowatości $U = 0\%$ określa wytrzymałość materiału nieporowatego. Inne badania wskazują na to, że wytrzymałość na rozciąganie spieków o porowatości w zakresie $U = 10 \div 60\%$ zmienia się nieliniowo ze zmianą porowatości.

Istotną zależność od porowatości materiału filtracyjnego wykazuje moduł sprężystości wzdłużnej E , przy czym jest on znacznie mniejszy od modułu materiałów nieporowatych. Można uzasadnić, że moduł sprężystości oraz wytrzymałość na rozciąganie są w przybliżeniu wprost proporcjonalne do przekroju powierzchni kontaktu ziaren. Jeśli przez A oznaczymy stosunek powierzchni kontaktu między cząstkami do nominalnego przekroju ciała porowatego między dwiema warstwami cząstek, to $0 \leq A \leq 1$. Uwzględniając własności materiału spiekanego z przypadkowo połączonych cząstek, przekrój kontaktowy można określić jako powierzchnię rzutu na odpowiednią płaszczyznę charakterystyczną najmniejszego kontaktu między dwoma jednostkowymi słojami podstawowych grup strukturalnych. Stąd zależności wskazujące na to, że moduł sprężystości ciała porowatego przy danej porowatości U_p i przekroju kontaktowym A w kierunku prostopadłym do tego przekroju

$$E_p = EA \quad (6.1)$$

oraz granica wytrzymałości na rozciąganie spiekanego materiału porowatego

$$G_p = GA \quad (6.2)$$

gdzie: E — moduł sprężystości materiału nieporowatego; G — granicę wytrzymałości na rozciąganie materiału nieporowatego.

Zatem, niezależnie od wielkości G i E przy danej porowatości $E_p/A = \text{const}$ oraz $G_p/E_p = G/E = \text{const}$ i ponadto $A = (1-U)^m$, przy czym $m \geq 3$.

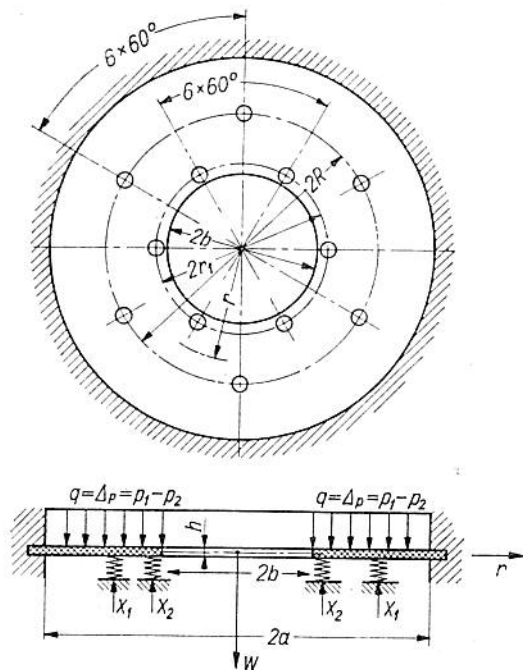
W dalszym ciągu rozpatrzono szczegółowo zagadnienia związane z obliczeniami statycznymi i wytrzymałościowymi filtru wysokociśnieniowego. Założono, że podstawowe wymiary geometryczne segmentu stanowiącego część wkładu filtru wynikają z przyję-

tego schematu konstrukcji talerzowej. Rozważania teoretyczne prowadzą do wzorów podstawowych, a podane przykłady obliczeniowe dotyczą filtru wykonanego z metalowego proszku spiekane-
 nego CuCn10. Ze względu na odmienność struktury materiału porowatego, podano dalej również przykłady określania na podstawie doświadczeń podstawowych parametrów wytrzymałościowych wraz z wynikami uzyskanymi podczas tych prób.

6.3. Obliczenia statyczne i wytrzymałościowe segmentu wysokociśnieniowego filtru talerzowego

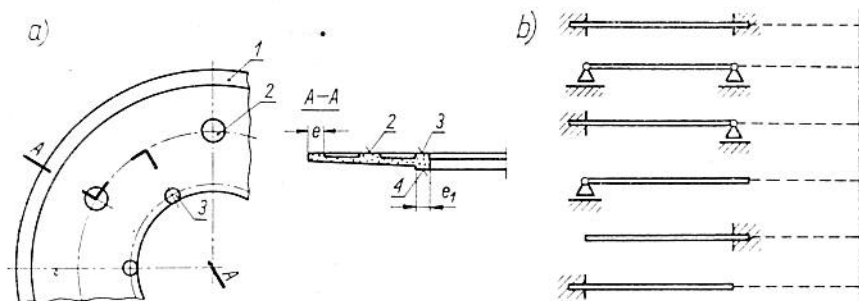
6.3.1. Założenia do obliczeń statycznych i wytrzymałościowych

Przedmiotem rozważań jest obliczanie segmentu filtru talerzowego jako płyty o szczególnym sposobie podparcia i obciążenia. Schemat statyczny płyty filtru przedstawiony na rys. 6.2 wska-



Rys. 6.2. Przyjęty do obliczeń schemat statyczny, obciążenie i wymiary geometryczne segmentu filtrującego

zuje na statyczną niewyznaczalność rozpatrywanego zagadnienia. Jako wielkości hiperstatyczne zaproponowano siły w podporach słupkowych równomiernie rozstawionych na obwodzie płyty pierścieniowej. Podano sposób rozwiązania powyższego zagadnienia przy wykorzystaniu klasycznej liniowej teorii płyt. Ponieważ materiał płyty filtru nie jest na ogół skatalogowany, jest konieczne przeprowadzenie badań wytrzymałościowych próbek materiału.



Rys. 6.3. a) Elementy podparcia płyty segmentu filtrującego, b) możliwe schematy statyczne; 1 — pierścień zewnętrzny, 2, 3 — podpory słupkowe, 4 — pierścień wewnętrzny

Schemat statyczny segmentu filtrującego w postaci płyty pierścieniowej jest jasny i nie budzi wątpliwości. Natomiast pewne zastrzeżenia może wywołać sposób podparcia brzegów płyty pierścieniowej. Zgodnie z rys. 6.3a brzegi płyty są oparte sprężystość na pierścieniu zewnętrznym 1 i wewnętrznym 4, przy czym $e > e_1$. Ze względu na to, że pierścienie o szerokości e dwóch segmentów są trwale połączone (spawane, lutowane) i tworzą jednolity segment podwójny oraz pierścień o szerokości e_1 , znajduje się na zewnątrz tego segmentu przyjęto schemat statyczny f przedstawiony na rys. 6.3b. Pominięto również w obliczeniach niewielkie pochylenie płyty przyjmując ją za poziomą. Zakładamy, że obciążenie płyty stanowi różnica ciśnienia $q = \Delta p = p_1 - p_2$, które jest równomiernie rozłożone na powierzchni płyty. Rozwiązanie zadania przeprowadzimy metodą sił. Metoda przemieszczeń będzie w szerokim zakresie stosowana do zadań pomocniczych, a mianowicie do wyznaczenia współczynników w równaniach kanonicznych. Ponieważ teoria płyt cienkich została wprowadzona na podstawie klasycznej liniowej teorii sprężystości, przeto obowiązywać będą wszystkie założenia stosowane w teorii sprężystości.

6.3.2. Rozwiązanie schematu dwukrotnie statycznie niewyznaczalnego metodą sił

Uwzględnienie w obliczeniu statycznym osiadania podpór sprężystych prowadzi do następującego układu równań kanonicznych

$$\left. \begin{aligned} \delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \delta_{10} &= -\frac{X_1 l_1}{EA_1} \\ \delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \delta_{20} &= -\frac{X_2 l_2}{EA_2} \end{aligned} \right\} \quad (6.3)$$

a stąd siły w podporach słupkowych pierścieniowej płyty filtru

$$X_1 = -\frac{1}{\delta_{21}} \left[\left(\delta_{22} + \frac{1}{K_2} \right) \frac{\delta_{10}\delta_{21} - \delta_{20} \left(\delta_{11} + \frac{1}{K_1} \right)}{\left(\delta_{11} + \frac{1}{K_1} \right) \left(\delta_{22} + \frac{1}{K_2} \right) - \delta_{12}\delta_{21}} - \delta_{20} \right] \quad (6.4)$$

$$X_2 = \frac{\delta_{10}\delta_{21} - \delta_{20} \left(\delta_{11} + \frac{1}{K_1} \right)}{\left(\delta_{11} + \frac{1}{K_1} \right) \left(\delta_{22} + \frac{1}{K_2} \right) - \delta_{12}\delta_{21}} \quad (6.5)$$

gdzie: δ_{11} , δ_{12} , δ_{10} , δ_{21} , δ_{22} , δ_{20} — współczynniki (przemieszczenia jednostkowe), l_1 , l_2 — wysokość słupkowych podpór sprężystych na płycie pierścieniowej, E — współczynnik sprężystości wzdłużnej (moduł Younga, materiału płyty filtru), A_1 , A_2 — pola przekroju poprzecznego podpór słupkowych, K_1 , K_2 — stałe podpór sprężystych.

Po obliczeniu wielkości X_1 i X_2 zadanie stanie się statycznie wyznaczalne, a wielkości statyczne lub geometryczne będzie można wyznaczyć przy zastosowaniu wzoru superpozycyjnego. Odskształcenia powierzchniowe płyty zależne od promienia r i kąta φ

$$W(r, \varphi) = \bar{W}(r) + X_1 \bar{W}_1(r, \varphi) + X_2 \bar{W}_2(r, \varphi) \quad (6.6)$$

przy czym

$$W_1^I(r, \varphi) = \begin{cases} \bar{W}_1^I(r, \varphi) & \text{dla } r \leq R \\ \bar{W}_1^{II}(r, \varphi) & \text{dla } r \geq R \end{cases} \quad (6.7)$$

gdzie: $\bar{W}(r)$ — odskształcenie powierzchniowe płyty zależne od promienia r bez uwzględnienia podpór słupkowych, $\bar{W}_1(r, \varphi)$, $\bar{W}_2(r, \varphi)$ — odskształcenie powierzchniowe płyt w punktach działania sił X_1 i X_2 zależne od promienia r i kąta φ bez uwzględnienia podpór, $\bar{W}_1^I(r, \varphi)$, $\bar{W}_1^{II}(r, \varphi)$ — odskształcenie powierzchniowe płyty siłą $X_1 = 1$ odpowiednio przy $b \leq r \leq R$ i $R \leq r \leq a$.

Podobne wzory można napisać dla kąta obrotu przekroju, momentu promieniowego i obwodowego oraz siły poprzecznej.

6.3.3. Obliczenie przemieszczeń δ_{10} , δ_{20} w układzie równań kanonicznych

Obliczenie przemieszczeń δ_{10} i δ_{20} nie sprawia większych trudności. Rozwiązać należy płytę pierścieniową bez podpór słupkowych, a następnie do otrzymanego wzoru na $\bar{W}(r)$ podstawić

$$\bar{W}(r)_{r=R} = \delta_{10} \quad \text{i} \quad \bar{W}(r)_{r \approx r_1 \approx b} = \delta_{20}$$

Wyniki obliczenia δ_{10} i δ_{20} przedstawiają wzory (6.8) i (6.9)

$$\delta_{10} = \bar{W}(r=R) = \frac{q}{8D} \left\{ b^2(b^2-A) \ln R - AR^2 \ln R + [(1+\ln b)A - 0,5\alpha b^2] R^2 + \frac{\alpha a^2 b^2}{2} - \frac{a^4}{8} - b^4 \ln a + A[\ln a(a^2+b^2) - a^2(1+\ln b)] + \frac{R^4}{8} \right\} \quad (6.8)$$

$$\delta_{20} = \bar{W}(r \approx r_1) = \frac{q}{8D} \left\{ b^2(b^2-A) \ln r_1 - Ar_1^2 \ln r_1 [(1+\ln b)A - 0,5\alpha b^2] r_1^2 + \frac{\alpha a^2 b^2}{2} - \frac{a^4}{8} - b^4 \ln a + A \ln a(a^2+b^2) - a^2(1-\ln b) + \frac{r_1^4}{8} \right\} \quad (6.9)$$

przy czym sztywność płyty na zginanie

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (6.10)$$

stały współczynnik zależny od α i wymiarów filtru

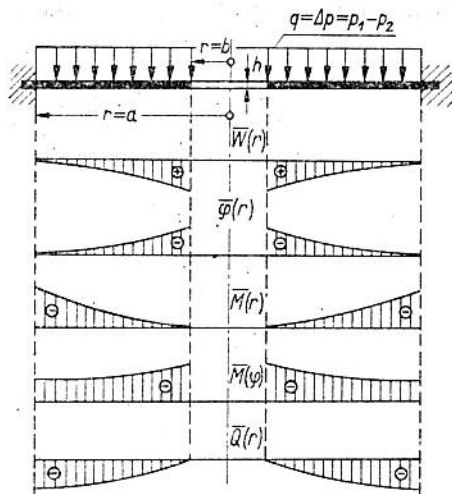
$$A = \frac{1}{2} \frac{a^4 + 2b^4 - 2\alpha a^2 b^2}{b^2 - a^2 + 2a^2 \ln \frac{a}{b}} \quad (6.11)$$

stały współczynnik zależny od liczby Poissona

$$\alpha = \frac{0,5 + 1,5\nu}{1 + \nu} \quad (6.12)$$

gdzie: a , b , h , r , r_1 , R — wymiary płyty filtru, ν — liczba Poissona.

Na rys. 6.4 podano wykresy ugięcia płyty filtru, kąta obrotu, momentu zginającego w kierunku promieniowym i skręcającego w kierunku obwodowym oraz siły poprzecznej przy obciążeniu płyty bez uwzględnienia podpór słupkowych.



Rys. 6.4. Wykresy ugięcia płyty filtru \bar{W}_r , kąta obrotu $\bar{\varphi}_r$, momentu zginającego w kierunku promieniowym \bar{M}_r i skręcającego w kierunku obwodowym \bar{M}_φ oraz siły poprzecznej \bar{Q}_r przy obciążeniu płyty bez uwzględnienia podpór słupkowych

6.3.4. Obliczenie przemieszczeń δ_{11} , $\delta_{12} = \delta_{21}$ w układzie równań kanonicznych

Zasadniczą trudność obliczenia przemieszczeń stanowi nieciągłość obciążenia X_1 zarówno w kierunku obwodowym jak i promieniowym.

Przedstawimy obciążenie $\bar{X}_1 = 1$ za pomocą szeregu Fouriera

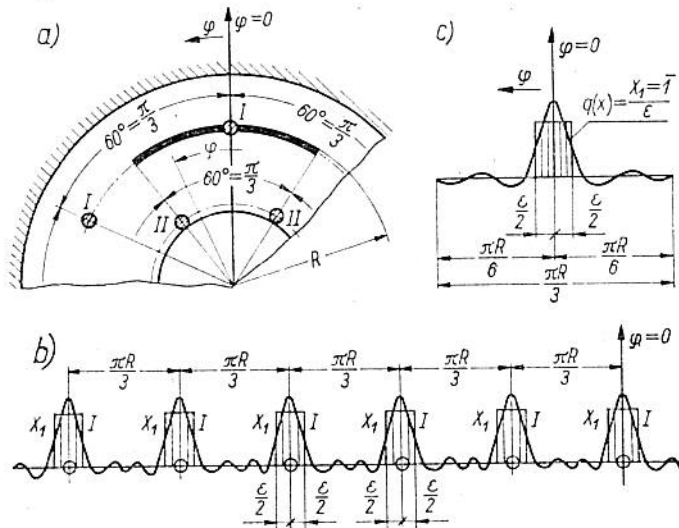
$$P(r = R; \varphi) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\varphi + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\varphi \quad -\frac{\pi}{6} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{6} \quad (6.13)$$

i obliczamy współczynniki rozwinięcia w granicach przedziału o dowolnej długości L

$$a_0 = \frac{2}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} q(x) dx = \frac{2}{L} \int_0^L f(x) dx \quad (6.14)$$

$$a_n = \frac{2}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} q(x) \cos \frac{2n\pi x}{L} dx = \frac{2}{L} \int_0^L q(x) \cos \frac{2n\pi x}{L} dx \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (6.15)$$

$$b_n = \frac{2}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} q(x) \sin \frac{2n\pi x}{L} dx = \frac{2}{L} \int_0^L q(x) \sin \frac{2n\pi x}{L} dx \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (6.16)$$



Rys. 6.5. Rozłożenie funkcji $X_1 = 1$ w szereg Fouriera o okresie $\frac{\pi R}{3}$. Grubą linią na rys. a) przedstawiono obciążenie rozłożone w szereg Fouriera

Następnie powyższe wzory odpowiednio przetransponujemy zgodnie z rys. 6.5. Funkcja obciążeniowa $q(x)$ ma następującą postać

$$q(x) = \begin{cases} 0 & \frac{\pi R}{6} \leq x \leq -\frac{\epsilon}{2} \\ \frac{X_1}{\epsilon} & -\frac{\epsilon}{2} \leq x \leq \frac{\epsilon}{2} \\ 0 & \frac{\epsilon}{2} \leq x \leq \frac{\pi R}{3} \end{cases} \quad -\frac{\pi}{6} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{6} \quad (6.17)$$

a więc

$$a_0 = \frac{3}{\pi R} \int_{-\frac{\epsilon}{2}}^{+\frac{\epsilon}{2}} \frac{X_1}{\epsilon} dx = \frac{3X_1}{\pi R} \quad (6.18)$$

$$a_n = \frac{2 \cdot 3}{\pi R} \int_{-\frac{\varepsilon}{2}}^{+\frac{\varepsilon}{2}} \frac{X_1}{\varepsilon} \cos \frac{3n\pi}{R} x dx = \frac{6X_1 \tau}{\varepsilon R \tau 3n} \left[\sin \frac{3n}{\pi} \frac{\varepsilon}{2} - \right. \\ \left. - \sin \frac{3n}{\pi} \left(-\frac{\varepsilon}{2} \right) \right] = \frac{12X_1}{R} \frac{\sin \frac{3n\varepsilon}{2\pi}}{2 \frac{3n\varepsilon}{2\pi}} = \frac{6X_1}{R} \quad (6.19)$$

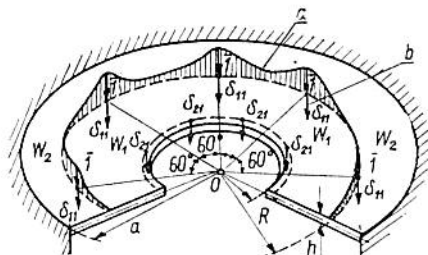
Ponieważ wyrażenie

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\sin \frac{3n\varepsilon}{2\pi}}{\frac{3n\varepsilon}{2\pi}} = 1 \quad (6.20)$$

można więc napisać

$$q(r = R; \varphi) = \frac{3X_1}{\pi R} \left(1 + 2 \sum_{n=0}^{\infty} \cos 3n\varphi \right) \quad (6.21)$$

Na rys. 6.5 pokazano rozłożenie obciążenia $X_1 = 1$ dla $n = 4$, zaś na rys. 6.6 dla $n = 1$.



Rys. 6.6. Rozłożone w szereg po obwodzie o promieniu R obciążenie $X = 1$. Graficzne przedstawienie współczynników równania kanonicznego metodą sil; a — funkcja obciążenia rozłożona w szereg Fouriera, b — wyznaczenie graficzne pomieszczeń jednostkowych δ_{11} i δ_{12}

Zgodnie z rys. 6.6 powierzchnię odkształconą płyty przyjmujemy

$$W_1(r, \varphi) = \sum_{m=0,1,2,\dots}^{\infty} W_m(r) \cos m\varphi \quad b \leq r \leq R \quad (6.22)$$

$$W_2(r, \varphi) = \sum_{m=0,1,2,\dots}^{\infty} W_m(r) \cos m\varphi \quad R \leq r \leq a \quad (6.23)$$

Podstawmy szeregi (6.21) oraz (6.22) i (6.23) do równania różniczkowego zginanej płyty, które po wprowadzeniu bezwymiarowej zmiennej $\varrho = r/a$, zapiszemy w następującej postaci

$$\begin{aligned} & \frac{D}{a^4} \left(\frac{1}{\varrho} \frac{\partial}{\partial \varrho} \left\{ \varrho \frac{\partial}{\partial \varrho} \left[\frac{1}{\varrho} \frac{\partial}{\partial \varrho} \left(\varrho \frac{\partial W}{\partial \varrho} \right) \right] \right\} + \frac{2}{\varrho} \left[\frac{\partial^2}{\partial \varrho \partial \varphi} \left(\frac{1}{\varrho} \frac{\partial^2 W}{\partial \varrho \partial \varphi} \right) + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{2}{\varrho^3} \frac{\partial^2 W}{\partial \varphi^2} \right] + \frac{1}{\varrho^4} \frac{\partial^4 W}{\partial \varphi^4} \right) = q - (1+\nu) \frac{D\alpha_t}{ha^2} \left[\frac{1}{\varrho} \frac{\partial}{\partial \varrho} \left(\varrho \frac{\partial \Delta T}{\partial \varrho} \right) + \right. \\ & \left. + \frac{1}{\varrho^2} \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial \varphi^2} \right] \end{aligned} \quad (6.24)$$

i stąd otrzymamy

$$\begin{aligned} & \frac{D}{a^4} \sum_{m=0,1,2,\dots}^{\infty} \left(\frac{1}{\varrho} \frac{d}{d\varrho} \left\{ \varrho \frac{d}{d\varrho} \left[\frac{1}{\varrho} \frac{d}{d\varrho} \left(\varrho \frac{dW_m}{d\varrho} \right) \right] \right\} - \frac{2m^2}{\varrho} \left[\frac{d}{d\varrho} \left(\frac{1}{\varrho} \frac{dW_m}{d\varrho} \right) + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{2}{\varrho^3} W_m + \frac{m^4}{\varrho^4} W_m \right] \cos m\varphi \right) = \sum_{m=0,1,2,\dots}^{\infty} q_m \cos m\varphi - \\ & - (1+\nu) \frac{D\alpha_t}{ha^2} \sum_{m=0,1,2,\dots}^{\infty} \left[\frac{1}{\varrho} \frac{d}{d\varrho} \left(\varrho \frac{d\Delta T}{d\varrho} - \frac{m^2}{\varrho^2} \Delta T_m \right) \right] \cos m\varphi \end{aligned} \quad (6.25)$$

Aby równanie to było spełnione dla każdej wartości, funkcje $W_m(\varrho)$ muszą spełniać następujące zwyczajne równanie różniczkowe

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\varrho} \frac{d}{d\varrho} \left\{ \varrho \frac{d}{d\varrho} \left[\frac{1}{\varrho} \frac{d}{d\varrho} \left(\varrho \frac{dW_m}{d\varrho} \right) \right] \right\} - \frac{2m^2}{\varrho} \left[\frac{d}{d\varrho} \left(\frac{1}{\varrho} \frac{dW_m}{d\varrho} \right) + 2 \frac{W_m}{\varrho^3} \right] + \\ & + \frac{m^4}{\varrho^4} W_m = \frac{a^4}{D} q_m(\varrho) - (1+\nu) \frac{a^2 \alpha_t}{h} \left[\frac{1}{\varrho} \frac{d}{d\varrho} \left(\varrho \frac{d\Delta T_m}{d\varrho} \right) - \right. \\ & \left. - \frac{m^2}{\varrho^2} \Delta T_m \right] \quad m = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (6.26)$$

Ponieważ w przypadku naszego zadania $\Delta T_m = 0$, zatem zajmować się będziemy równaniem, którego ostatni wyraz po prawej stronie jest równy zeru.

Całkę ogólną równania jednorodnego

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\varrho} \frac{d}{d\varrho} \left\{ \varrho \frac{d}{d\varrho} \left[\frac{1}{\varrho} \frac{d}{d\varrho} \left(\varrho \frac{dW_m}{d\varrho} \right) \right] \right\} - \frac{2m^2}{\varrho} \left[\frac{d}{d\varrho} \left(\frac{1}{\varrho} \frac{dW_m}{d\varrho} \right) + \frac{2W_m}{\varrho^3} \right] + \\ & + \frac{m^4}{\varrho^4} W_m = 0 \end{aligned} \quad (6.27)$$

znajdziemy zakładając, że ma ona postać

$$W_m = \varrho^k \quad (6.28)$$

gdzie k jest na razie nieznaną wielkością

Równanie charakterystyczne ma postać

$$k^2(k-2)^2 - 2m^2[k(k-2) + 2] + m^4 = 0 \quad (6.29)$$

przy czym można również zapisać go następująco

$$(k^2 - m^2)[(k-2)^2 - m^2] = 0 \quad (6.30)$$

skąd pierwiastki równania

$$k_{1,2} = \pm m, k_{3,4} = 2 \pm m$$

Zatem w ogólnym przypadku całkę ogólną równania (6.27) można napisać w postaci

$$W_m(\varrho) = A_m \varrho^m + B_m \varrho^{-m} + C_m \varrho^{2+m} + D_m \varrho^{2-m} \quad (6.31)$$

Całka ta przyjmuje jednak inną postać w dwóch przypadkach szczególnych: dla $m = 0$ i dla $m = 1$. Wówczas mamy bowiem do czynienia z podwójnymi pierwiastkami równania charakterystycznego i całki ogólne wyrażamy w sposób następujący

$$W_0(\varrho) = A_0 + B_0 \ln \varrho + C_0 \varrho^2 + D_0 \varrho^2 \ln \varrho \quad (6.32)$$

$$W_1(\varrho) = A_1 \varrho + B_1 \frac{1}{\varrho} + C_1 \varrho^2 + D_1 \varrho \ln \varrho \quad (6.33)$$

Całkę szczególną podamy jedynie dla przypadku, gdy obciążenie $q_m(\varrho)$ i różnica temperatur $\Delta T_m(\varrho)$ wyraża się w postaci wielomianów

$$q_m(\varrho) = \sum_{\substack{k=-3 \\ k \neq -2 \pm m \\ k \neq -4+m}}^p q_{m,k} \varrho^k; \quad \Delta T_m(\varrho) = \sum_{\substack{k=-1 \\ k \neq -2m}}^s \Delta T_{m,k} \varrho^k \quad (6.34)$$

Całka szczególna ma wówczas postać

$$W_{m,q}(\varrho) = \frac{a^4}{D} \sum_{\substack{k=-3 \\ k \neq -2 \pm m \\ k \neq -4+m}}^p \frac{q_{m,k} \varrho^{k+4}}{[(k+2)^2 - m^2][(k+4)^2 - m^2]} - \\ - (1+\nu) \frac{\alpha_l a^2}{h} \sum_{\substack{k=-1 \\ k \neq -2+m}}^s \frac{\Delta T_{m,k} \varrho^{k+2}}{(k+2)^2 - m^2} \quad (6.35)$$

Ze względu na przybliżony charakter tego obliczenia ograniczymy dalej nasze rozważania do jednego tylko wyrazu szeregu: dla $m = 0$.

Jak pokazano na rys. 6.6 powierzchnia odkształcona płyty będzie wówczas określona dwiema funkcjami W_1 i W_2 . Całki szczególne są w tym przypadku równe zeru ze względu na osobliwość obciążenia

$$W_1 = C_1 \ln r + C_2 r^2 \ln r + C_3 r^2 + C_4 \quad b \leq r \leq R \quad (6.36)$$

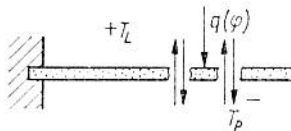
$$W_2 = \bar{C}_1 \ln r + \bar{C}_2 r^2 \ln r + \bar{C}_3 r^2 + \bar{C}_4 \quad R \leq r \leq a \quad (6.37)$$

Warunki brzegowe są następujące

$$\left. \begin{array}{l} M_r = 0 \Big|_{r=b}; \quad -D \left(\frac{d^2 W_1}{dr^2} + \frac{\nu}{r} \frac{dW_1}{dr} \right) = 0; \\ Q_r = 0 \Big|_{r=b}; \quad -D \frac{d}{dr} \left(\frac{d^2 W_1}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dW_1}{dr} \right) = 0 \\ \left. \begin{array}{l} W_2 = 0 \\ \frac{dW_2}{dr} = 0 \end{array} \right\} \text{ dla } r = a \end{array} \right\} \quad (6.38)$$

Warunki ciągłości na obwodzie o promieniu $r = R$ można (rys. 6.7) zapisać następująco

$$W_1 \Big|_{r=R} = W_2 \Big|_{r=R}; \quad \frac{dW_1}{dr} \Big|_{r=R} = \frac{dW_2}{dr} \Big|_{r=R}; \quad M_r^2 = M_r^1; \quad Q_L - Q_o = q(\varphi) \quad (6.39)$$



Rys. 6.7. Siły poprzeczne w przekrojach płyty filtru

Ostatnie dwa warunki dla $r = R$ po podstawieniu znanych zależności można napisać

$$-D \left(\frac{d^2 W_1}{dr^2} + \frac{\nu}{r} \frac{dW_1}{dr} \right) = -D \left(\frac{d^2 W_2}{dr^2} + \frac{\nu}{r} \frac{dW_2}{dr} \right) \quad (6.40)$$

$$\begin{aligned} -D \left(\frac{d^3 W_2}{dr^3} + \frac{1}{r} \frac{d^2 W_2}{dr^2} - \frac{1}{r^2} \frac{dW_2}{dr} \right) + D \left(\frac{d^3 W_1}{dr^3} + \frac{1}{r} \frac{d^2 W_1}{dr^2} - \right. \\ \left. - \frac{1}{r^2} \frac{dW_1}{dr} \right) = q(\varphi) \end{aligned} \quad (6.41)$$

Tak więc zadanie jest jednoznaczne w rozwiązaniu. Do dyspozycji są cztery warunki brzegowe i cztery warunki ciągłości, z których można wyznaczyć osiem stałych całkowania.

Nie pokażemy tutaj żmudnego sposobu rozwiązywania tego układu, napiszemy jedynie zależności wprowadzone, a mianowicie

$$\delta_{11} = W_1 = \frac{\psi(\varphi=0)}{\mathcal{L}} \left\{ -b^2 \ln R - R^2 \ln R + \frac{R^2}{\alpha_2} [b^2(\nu-1) + \alpha_1] + F \right\} \quad (6.42)$$

$$\psi'(\varphi) = \frac{3}{4\pi RD} (1 + 2\cos 3\varphi) = \frac{3}{4\pi RD} (1+2) = \frac{9}{4\pi RD} \quad (6.43)$$

oraz

$$\delta_{21} = \delta_{12} = W_1 = \frac{\psi\left(\varphi = \frac{\pi}{6}\right)}{\mathcal{L}} \left\{ -b^2 \ln r_1 - r_1^2 \ln r_1 + \frac{r_1^2}{\alpha_2} [b^2(\nu-1) + \alpha_1] + F \right\} \quad (6.44)$$

$$\psi'(\varphi) = \frac{3}{4\pi RD} \left(1 + 2 \cos \frac{3\pi}{6} \right) = \frac{3}{4\pi RD} \quad (6.45)$$

W powyższych wzorach zastosowano następujące oznaczenia skracające zapis

$$F = -b^2 L_{21} - L_{22} + L_{23} \frac{b^2(\nu-1) + \alpha_1}{\alpha_2} + L_{24} \mathcal{L}$$

$$\mathcal{L} = \frac{1}{T} = \frac{1}{L_{20}} \left\{ b^2 \left[L_{17} + \frac{L_{13}}{\alpha_2} (1-\nu) \right] + L_{18} - \frac{\alpha_1}{\alpha_2} L_{19} \right\}$$

$$\alpha_1 = b^2(3 + 2\ln b) + \nu b^2(2\ln b + 1) \quad \alpha_2 = 2b^2(1 + \nu)$$

$$L_{24} = L_1 \ln R - L_8 R^2 \ln R + L_9 R^2 + L_{13}$$

$$L_{23} = L_4 \ln R + L_7 R^2 \ln R + L_{12} R^2 + L_{16} - R^2$$

$$L_{22} = L_2 \ln R + L_6 R^2 \ln R + L_{11} R^2 + L_{15} - R^2 \ln R$$

$$L_{21} = L_1 \ln R + L_5 R^2 \ln R + L_{10} R^2 + L_{14} - \ln R$$

$$L_{20} = L_1 - a^2(2\ln a + 1)L_8 + 2a^2 L_9$$

$$L_{19} = -L_4 + a^2(2\ln a + 1)L_7 + 2a^2 L_{12}$$

$$L_{18} = L_3 + a^2(2\ln a + 1)L_6 + 2a^2L_{11}$$

$$L_{17} = L_2 + a^2(2\ln a + 1)L_5 + 2a^2L_{10}$$

$$L_{16} = L_4 \ln a - a^2 \ln a L_7 - a^2 L_{12}$$

$$L_{15} = -L \ln a - a^2 \ln a L_6 - a^2 L_{11}$$

$$L_{14} = -L_3 \ln a - a^2 \ln a L_5 - a^2 L_{10}$$

$$L_{13} = -L_1 \ln a + L_8 a^2 \ln a - L_9 a^2$$

$$L_{12} = -\frac{1}{2a^2} \left(\frac{KN}{S_2 - AS_1} - \frac{AK}{S_2 - AS_1} \right)$$

$$L_{11} = -\frac{1}{2a^2} \left[A - \frac{A(B - AS_1)}{S_2 - AS_1} + \frac{N(B - AS_1)}{S_2 - AS_1} \right]$$

$$L_{10} = -\frac{1}{2a^2} \left[1 - \frac{(\nu - 1 - S_1)A}{S_2 - AS_1} + \frac{N(\nu - 1 - S_1)}{S_2 - AS_1} \right]$$

$$L_9 = -\frac{1}{2a^2} \left(1 + \frac{AS_1}{S_2 - AS_1} - \frac{NS_1}{S_2 - AS_1} \right)$$

$$L_8 = \frac{S_1}{S_2 - AS_1}, \quad L_7 = \frac{K}{S_2 - AS_1}, \quad L_6 = \frac{B - AS_1}{S_2 - AS_1}$$

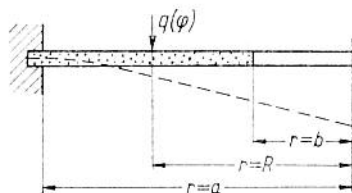
$$L_5 = \frac{\nu - 1 - S_1}{S_2 - AS_1}, \quad L_4 = \frac{AK}{S_2 - AS_1}, \quad L_3 = -\frac{A(B - AS_1)}{S_2 - AS_1}$$

$$L_2 = 1 - \frac{(\nu - 1 - S_1)A}{S_2 - AS_1}, \quad L_1 = 1 + \frac{AS_1}{S_2 - AS_1},$$

$$S_1 = \nu - 1 - \frac{K}{2a^2}, \quad S_2 = B - \frac{NK}{2a^2}, \quad A = \frac{B - 2R^2}{4}$$

$$B = R^2(3 + 2\ln R) + \nu R^2(2\ln R + 1), \quad K = 2R^2 + 2\nu R^2, \quad N = a^2(2\ln a + 1)$$

Obliczenie δ_{11} oraz $\delta_{12} = \delta_{21}$ można jeszcze uprościć, rezygnując jednak ze ścisłości rozwiązania. Przez analogię do belki wspornikowej założymy, że odkształcona powierzchnia przed obciążeniem



Rys. 6.8. Schemat statyczny do obliczeń uproszczonych płyty pierścieniowej filtru

$q(\varphi)$ jest w przekroju prostą wzdłuż promienia (rys. 6.8). Założenie to prowadzi do następujących warunków brzegowych:

$$r = a, W_2 = 0; \quad r = a, \frac{dW_2}{dr} = 0; \quad r = R, M_r = 0; \quad \frac{d^2W_2}{dr^2} +$$

$$+ \frac{\nu}{r} \frac{dW_2}{dr} = 0; \quad r = R, T_L = -q(\varphi)$$

$$D \left(\frac{d^3W_2}{dr^3} + \frac{1}{r} \frac{d^2W_2}{dr^2} - \frac{1}{r^2} \frac{dW_2}{dr} \right) = q(\varphi) \quad (6.46)$$

Odształcona powierzchnia środkowa ma kształt

$$W_2 = C_1 \ln r + C_2 r^2 \ln r + C_3 r^2 + C_4$$

Tak więc do wyznaczenia stałych C_1, C_2, C_3, C_4 mamy cztery warunki brzegowe (6.46). Po szczegółowych obliczeniach otrzymujemy

$$C_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta}, \quad C_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta}, \quad C_3 = \frac{\Delta_3}{\Delta}, \quad C_4 = -C_1 \ln a - C_2 a^2 \ln a - C_3 a^2 \quad (6.47)$$

przy czym

$$\Delta = \frac{Ba}{R^3} \left[\nu - 1 - (1 + \nu)(2 \ln a + 1) + 3 + \nu + 2 \ln R(1 + \nu) - \frac{R^2(1 + \nu)}{a^2} \right] \quad (6.48)$$

$$\Delta_3 = \frac{q(\varphi)}{D} \left[\frac{1}{a} (3 + \nu + 2 \ln R + \nu 2 \ln R) - \frac{a(2 \ln a + 1)(\nu - 1)}{R^2} \right] \quad (6.49)$$

$$\Delta_2 = \frac{q(\varphi)}{D} \left[-\frac{2(1 + \nu)}{a} + \frac{2a(\nu - 1)}{R^2} \right] \quad (6.50)$$

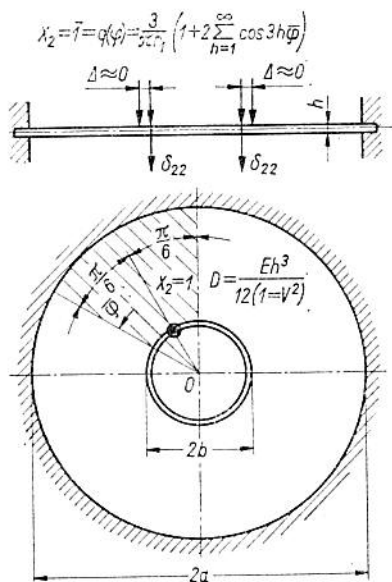
$$\Delta_1 = \frac{q(\varphi)}{D} [-2a(3 + \nu + 2 \ln R + 2\nu \ln R) + 4a(1 + \nu)(2 \ln a + 1)] \quad (6.51)$$

6.3.5. Obliczenie przemieszczenia δ_{22} w układzie równania kanonicznego metodą sił

Obliczenie δ_{22} przeprowadzimy przy pewnym uproszczeniu geometrycznym. Jeśli przyjmiemy na rys. 6.9, że $r_1 \approx b$, wówczas rozwiązanie znacznie się upraszcza.

Równanie różniczkowe ma w tym przypadku postać

$$\frac{d^3W}{dr^3} + \frac{1}{r} \frac{d^2W}{dr^2} - \frac{1}{2} \frac{dW}{dr} = \frac{Q_r}{D} \quad (6.52)$$



Rys. 6.9. Schemat statyczny przedstawiający graficznie ideę obliczenia δ_{22}

przy czym siłę poprzeczną obliczymy z zależności

$$Q_r \frac{2\pi r}{6} = \frac{2\pi}{6} b \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos 3n\bar{\varphi} \right) \frac{3}{\pi r_1} \quad (6.53)$$

uwzględniając $n = 1$ oraz $-\frac{\pi}{6} \leq \bar{\varphi} \leq \frac{\pi}{6}$, otrzymamy

$$Q_r = \frac{3b}{\pi r r_1} (1 + 2 \cos 3\bar{\varphi}) \quad (6.54)$$

Po podstawieniu ostatniej zależności do równania wyjściowego otrzymamy

$$W = \frac{3(1 + 2 \cos 3\bar{\varphi}) b r^2 \left(\ln \frac{r}{a} - 1 \right)}{4\pi D r_1} - C_1 \frac{r^2}{4} - C_2 \ln r + C_3 \quad (6.55)$$

Według Timoszenki postać rozwiązania powyższego równania jest nieco odmienna

$$W = \frac{3(1+2\cos 3\bar{\varphi})br^2\left(\ln\frac{r}{a}-1\right)}{4\pi D r_1} - C_1 \frac{r^2}{4} - C_2 \ln\frac{r}{a} + C_3 \quad (6.56)$$

Przyjmujemy do dalszego obliczenia postać (6.55). Trzy stałe całkowania wyznaczmy z warunków brzegowych

$$\left. \begin{aligned} r = a, \quad W = 0; \quad r = a, \quad \frac{dW}{dr} = 0; \quad r = b, \quad M_r = 0 \\ -D\left(\frac{d^2W}{dr^2} + \frac{\nu}{r} \frac{dW}{dr}\right) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (6.57)$$

Ostatecznie napiszemy

$$\delta_{22} = W = \frac{\beta(\bar{\varphi} = 0)}{2} \left[b^2(\ln b - 1) - \frac{E_1 b^2}{2(1-\nu)(a^2+b^2)} + a^2 E_2 \ln b + E_3 \right] \quad (6.58)$$

przy czym

$$E_1 = (1-\nu)a^2(2\ln a - 1) + (1+\nu\xi)b^2(2\ln b + 1) \quad (6.59)$$

$$E_2 = \frac{1}{(1-\nu)(a^2+b^2)} [(1-\nu)a^2(2\ln a - 1) + (1+\nu\xi)b^2(2\ln b + 1)] + a(2\ln a - 1) \quad (6.60)$$

$$E_3 = 2\ln a - 1 + \frac{1}{2(1-\nu)(a^2+b^2)} [(1-\nu)a^2(2\ln a - 1) + (1+\nu\xi)b^2(2\ln b + 1)] - a \ln a \left\{ \frac{1}{(1-\nu)(a^2-b^2)} [(1-\nu)a^2(2\ln a - 1) + (1+\nu\xi)b^2(2\ln b + 1)] - a^2(2\ln a - 1) \right\} \quad (6.61)$$

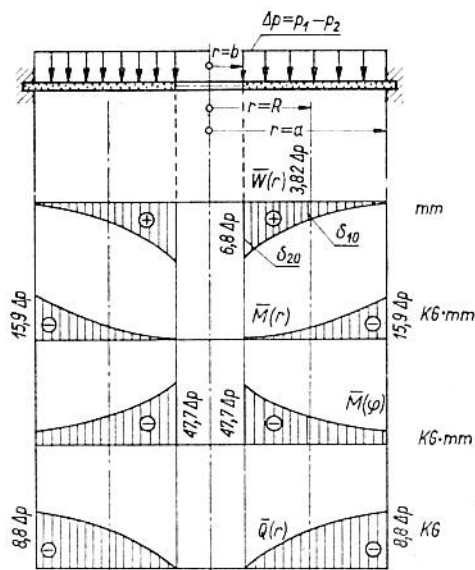
$$\beta(\bar{\varphi}) = \frac{3(1+2\cos 3\bar{\varphi})b}{2\pi D r_1} \quad (6.62)$$

$$\xi = \frac{2\ln b - 1}{2\ln b + 1} \quad (6.63)$$

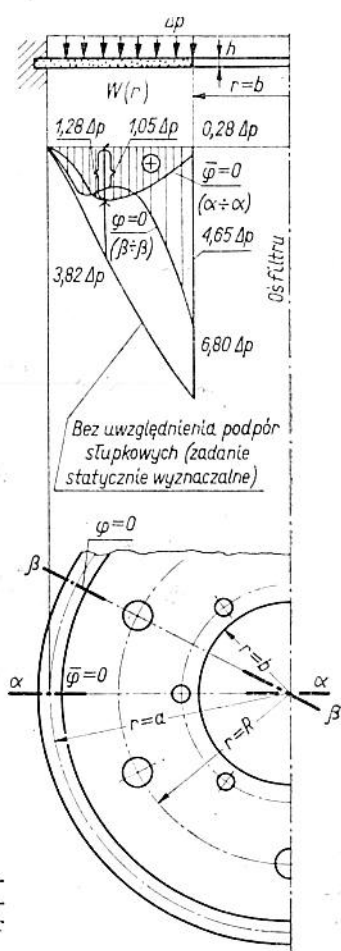
6.3.6. Przykład rachunkowy

Obliczenia szczegółowe segmentu filtra cieczy typoszeregu FG1-16-XD. Ma on następujące wymiary geometryczne $h = 1,90$ mm, $b = 13,75$ mm, $a = 31,50$ mm, $r = 19,50$ mm, $R = 23,00$ mm. Przyjmujemy na podstawie badań próbek materiału filtracyjnego $E = 3000$ kG/mm², $\nu = 0,2$.

Wyniki obliczeń na podstawie wyprowadzonych zależności teoretycznych zestawiono na wykresach przedstawionych na rys. 6.10 i 6.11. Przy spadku ciśnienia na filtrze $\Delta p = 50$ kG/cm² otrzymano



Rys. 6.10. Wykresy \bar{W}_r , \bar{M}_r , \bar{M}_φ , \bar{Q}_r w funkcji różnicy ciśnień Δp . Do wszystkich wzorów należy podstawiać Δp w kG/mm². Jednostki otrzymanych wielkości geometrycznych i statycznych są podane po prawej stronie rysunku

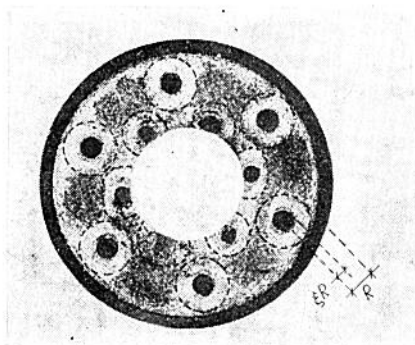


Rys. 6.11. Schemat statyczny i wykres ugięć płyty filtra z uwzględnieniem oraz bez uwzględnienia podpór słupkowych

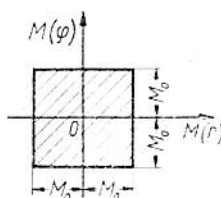
z obliczeń następujące naprężenia bez uwzględnienia podpór słupkowych, $\sigma_r = 13,20 \text{ kG/mm}^2$, $\sigma^b = 39,70 \text{ kG/mm}^2$, $\tau_{max} = 3,59 \text{ kG/mm}^2$. Naprężenia te uwzględniające bardziej niekorzystny przypadek konstrukcji segmentu filtru przekraczają znacznie wartości dopuszczalne. Zastosowane podpory słupkowe spełniają dobrze wyznaczone im zadania. Badania laboratoryjne w specjalnej komorze ciśnień segmentów filtru potwierdziły prawidłowość obliczeń i wyniki uzyskane analitycznie i doświadczalnie różnią się w punktach największych odkształceń tylko o ok. 5%.

6.4. Nośność graniczna płyty wysokociśnieniowego filtru talerzowego

Przedstawiona w tym punkcie metoda postępowania jest odmiennym ujęciem zagadnienia obliczeń wytrzymałościowych. Przedmiotem rozważań jest obliczanie przy zastosowaniu teorii nośności granicznej (teoria plastyczna) filtru wysokociśnieniowego o kształcie talerzowym.



Rys. 6.12. Siatka zmęczeniowa płyty metalowego filtru spiekane



Rys. 6.13. Przyjęty warunek plastyczności

Założeniem wyjściowym jest siatka zmęczeniowa typowa dla płyty filtru (rys. 6.12) otrzymana przez zniszczenie segmentu o odpowiednio zaprojektowanej komorze. Ponadto założymy, że materiał płyty jest jednorodny, a współczynniki elastoplastyczności materiału w dwu wzajemnie prostopadłych kierunkach promiennym i obwodowym mają tę samą wartość. Nie będziemy uwzględniali efektu ortotropowego, zatem momenty zginające na podpo-

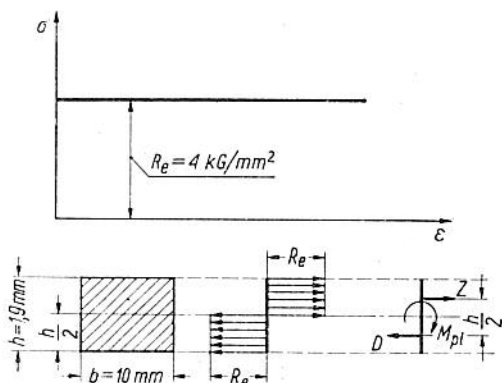
rach i w przęsłach są sobie równe co do wartości, a przeciwne co do znaku (rys. 6.13). Przy rozwiązaniu zadania wykorzystano prace: [81], [108] i [109]. Jak wiadomo dwa podstawowe twierdzenia z teorii nośności granicznej umożliwiały ocenę granic przedziału, w którym jest zawarta rzeczywista wielkość obciążenia łamiącego, gdy ściśle rozwiązanie zagadnienia nie jest możliwe. Twierdzenia te dla górnej i dolnej granicy są następujące:

1) konstrukcja ulega zmęczeniu pod działaniem obciążenia, jeśli istnieją takie geometryczne dopuszczalne przyrosty odkształceń plastycznych (pole przyrostów przemieszczeń), dla których przyrost pracy wykonywanej przez siły zewnętrzne jest równy albo przewyższa przyrost energii rozpraszanej przez siły wewnętrzne w całym obszarze ciała;

2) jeśli istnieje statycznie dopuszczalne pole naprężenia, tzn. będące w równowadze z działającymi siłami zewnętrznymi i nie przekraczające warunku plastyczności, to konstrukcja nie ulega zniszczeniu albo znajduje się w stanie równowagi granicznej.

Na podstawie tych twierdzeń można obliczyć obciążenia łamiące przy zastosowaniu dwu metod. Pierwszą z tych metod można nazwać statyczną drugą zaś — kinematyczną. Przy spełnieniu określonego warunku plastyczności rozwiązanie kompletne zagadnienia musi łączyć w sobie cechy rozwiązania statycznego i kinetycznego; wówczas pole przyrostu odkształceń i pole sił wewnętrznych, są związane z zastosowanym prawem plastycznego płynięcia.

Przykład. Zgodnie z wynikami doświadczenia rys. 6.12 oraz rys. 6.14 obliczymy moment zginający plastyczny M_{pl} .



Rys. 6.14. Określenie momentu plastycznego jednostkowego zgodnie z wynikami doświadczenia

Dla

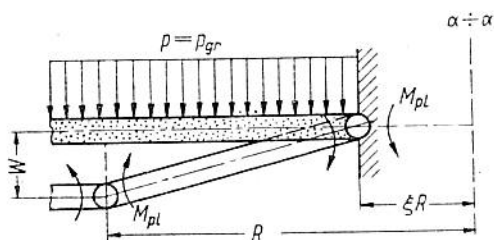
$$Z = D = R_c \frac{bh}{2}, \quad M_{pl} = Z \frac{h}{2} = R_c \frac{bh^2}{4} \quad (6.64)$$

Podstawiając dane płyty filtru otrzymamy

$$M_{pl} = 4 [\text{kG/mm}^2] \cdot 0,5 \cdot 10 [\text{mm}] \cdot 1,9^2 [\text{mm}^2] = 72,2 \text{ kG} \cdot \text{mm}$$

Nośność graniczna g_{gr} (ciśnienie niszczące) płyty filtru (rys. 6.15) określimy na podstawie wyprowadzonego przez A. Sawczuka [108] wzoru

$$p_{gr} = \frac{6 M_{pl}}{R^2} \frac{1}{(1 - \xi)^2 (\xi + 2)} \quad (6.65)$$



Rys. 6.15. Określenie ciśnienia niszczącego p_{gr}

Na podstawie siatki zmęczeniowej $\xi R = 2,5 \text{ mm}$, $R = 3,75 \text{ mm}$, zatem $p_{gr} = 36,5 \text{ kG/mm}$, a na 1 cm szerokości $p_{gr} = 365 \text{ kG/cm}^2$. Przyjmując współczynnik bezpieczeństwa $n = 5$ można określić dopuszczalną różnicę ciśnień działających na płytę segmentu filtrującego $p_{dop} = p_{gr}/n$. W rozważanym tutaj przypadku konstrukcyjnym wyniosła ona ok. 70 kG/cm^2 . Dobór odpowiedniego współczynnika bezpieczeństwa jest uzależniony od odpowiednich „predyspozycji” materiału filtracyjnego z jednej strony i od sprawdzenia ich na obiektach w naturze. Wiadomo, że materiały spiekane z ziarn są mniej odporne na przeciążenia spadkiem ciśnienia niż na przykład materiały spiekane z włókien lub tkaniny. W tych ostatnich wartość współczynnika n może być przyjmowana w zakresie od 2 do 4.

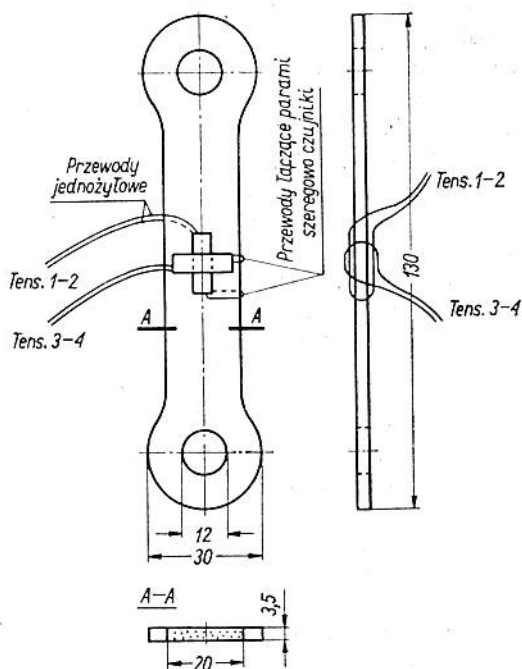
Przytoczone opracowanie jest oparte na pierwszym przybliżeniu skomplikowanego ustroju płyty filtru. Uściślenia obliczeń można dokonać w podobny sposób zmieniając warunek plastyczności, siatkę odkształceń itp.

6.5. Badania parametrów wytrzymałościowych materiałów filtracyjnych

6.5.1. Metoda badań

W wielu przypadkach jest konieczne przeprowadzenie badań laboratoryjnych wytrzymałości nowych materiałów filtracyjnych. Dotyczy to głównie określenia modułu sprężystości E i współczynnika Poissona ν . Opiszemy tutaj badania próbek wykonanych z proszku kulistego CuSn10. Próbki serii I z proszku kulistego o wielkości ziarn $0,1 \div 0,2$ mm i próbki serii II z proszku kulistego o wielkości $0,2 \div 0,3$ mm, ze względu na brak norm dotyczących doboru kształtu próbek do badań wytrzymałościowych, wykonano w kształcie przedstawionym na rys. 6.16; na rysunku podano również wymiary oraz sposób zamocowania tensometrów.

Badania prowadzono metodą tensometrii elektrooporowej. W środku długości każdej próbki naklejono w kierunku mierzo-



Rys. 6.16. Wymiary próbki spieku porowatego CuSn10 do badań E , ν oraz sposób naklejenia tensometrów

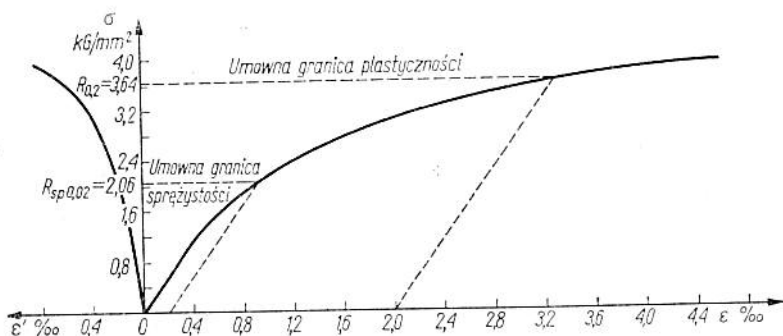
nych odkształceń 4 czujniki typu kratowego (RL 15/129), o współczynniku czułości $k = 2,25$. W celu zmierzenia wydłużeń jednostkowych ε dwa spośród tych czujników naklejono na obu stronach próbki w kierunku jej osi wzdłużnej; w celu zmierzenia zwężenia jednostkowego ε' pozostałe dwa czujniki naklejono również po obu stronach próbki prostopadle do osi wzdłużnej. Każdą parę czujników połączono ze sobą szeregowo, co umożliwia od razu pomiar wartości średniej ε lub ε' .

Pomiary przeprowadzono z wykorzystaniem mostka tensometrycznego, produkcji polskiej — ZKTR, przy użyciu tensometrów kompensacyjnych naklejonych każdorazowo na materiał identyczny z materiałem badanych próbek. Każdą z próbek zamocowano w szczękach płaskich maszyny wytrzymałościowej przez 4 nakładki duraluminiowe o wymiarach $32 \times 32 \times 6$ mm z otworami $\varnothing 10$ mm. Między nakładkami a próbką umieszczono warstwy ołowiu o grubości 0,8 mm. Przez otwory w próbce i nakładkach przepuszczono dopasowane do nich okrągłe trzpienie stalowe o długości 15 mm, a więc takie, aby ich końce swobodnie kryły się w otworach nakładek. W celu zwiększenia przyczepności na powierzchni nakładki przylegającej do ołowiu, naniesiono rysikiem małe rowki prostopadle do kierunku rozciągania. Takie zamocowanie umożliwia przekazanie siły rozciągającej na próbkę częściowo przez tarcie, a częściowo przez trzpień pracujący na ścinanie.

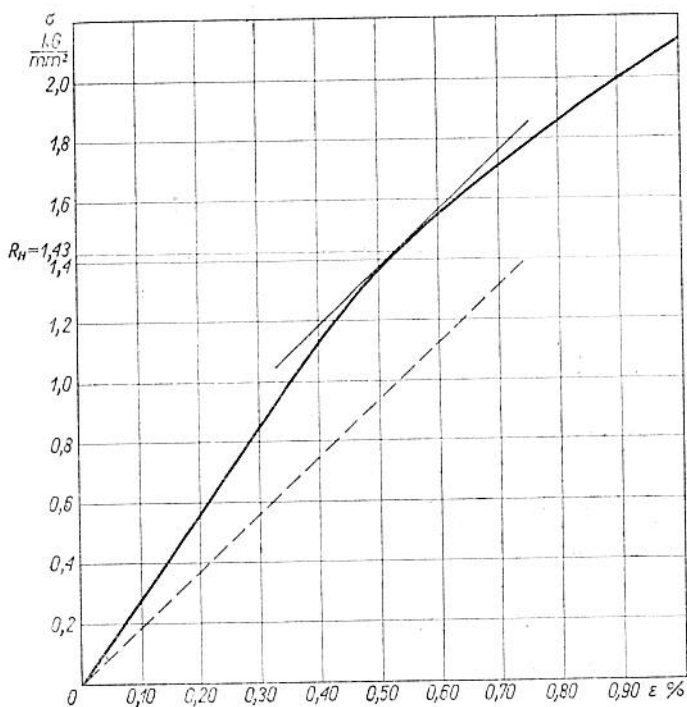
Badania prowadzono na maszynie wytrzymałościowej Schoppera o sile rozciągającej 2500 kG przy zakresie pomiarowym 1000 kG i elementarnej działce siłomierza 2 kG (próbki serii I oraz przy zakresie 500 kG i elementarnej działce siłomierza 1 kG (próbki serii I i II). Obciążenie próbek realizowano za pomocą napędu ręcznego przy stopniowaniu przyrostu siły co $\Delta P = 10$ kG, rejestrując jednocześnie wydłużenia ε i zwężenia ε' jednostkowe. Wyniki pomiarów są podstawą do sporządzenia wykresu rozciągania $\sigma - \varepsilon$, dla każdej próbki. Skale wykresów najwygodniej dobierać zgodnie z PN-62/H-04310.

Obliczenie modułu sprężystości E i współczynnika Poissona ν przeprowadzono na podstawie początkowej, prostoliniowej na ogół części wykresu, przy działającej sile rozciągającej $P \leq 80$ kG. Wszystkie badania z wyjątkiem wstępnych przeprowadzono stosując trzykrotne obciążenie i odciążenie próbek do wartości $P = 80$ kG.

Oprócz wartości T i ν dla poszczególnych próbek jest możliwe wyznaczenie także umownej granicy sprężystości $R_{sF0,02}$, umownej granicy plastyczności $R_{0,2}$, a także umownej granicy proporcjonalności R_H i wytrzymałości na rozciąganie materiału R_m .



Rys. 6.17. Wykres rozciągania próbki serii I z materiału CuSn10 (brąz cynowy); $\epsilon' = \nu\epsilon$ — jednostkowe odkształcenie poprzeczne, $\epsilon = \Delta l/l$ — odkształcenie jednostkowe wzdłużne, σ — naprężenia normalne



Rys. 6.18. Graficzny sposób wyznaczenia granicy proporcjonalności R_H próbki serii I

6.5.2. Przykładowe wyniki badań

Wyniki pomiarów jednej z próbek serii I podano na wykresie rozciągania (rys. 6.17). W celu wyznaczenia granicy proporcjonalności R_H początkową część wykresu $\sigma-\varepsilon$ przedstawiono ponadto w powiększonej czterokrotnie skali (rys. 6.18). Otrzymujemy kolejno $R_H = 1,43 \text{ kG/mm}^2$, umowna granica sprężystości $R_{sp0,02} = 2,06 \text{ kG/mm}^2$ oraz umowna granica plastyczności $R_{0,2} = 3,64 \text{ kG/mm}^2$. Do obliczenia E i ν wykorzystano część wykresu odpowiadającą $\sigma \leq 0,8 R_H = 1,143 \text{ kG/mm}^2$. Ta część wykresu jest prostopadłościowa, co umożliwiło bezpośrednie wyznaczenie E i ν .

Dla wartości $\sigma = 1,143 \text{ kG/mm}^2$ mamy $\varepsilon = 0,4\text{‰}$ oraz $\varepsilon' = 0,08\text{‰}$. Stąd otrzymujemy

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{1,143}{0,0004} = 2860 \text{ kG/mm}^2$$

oraz

$$\nu = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} = \frac{0,00008}{0,00040} = 0,20$$

Siła niszcząca próbkę $P_r = 274 \text{ kG}$.

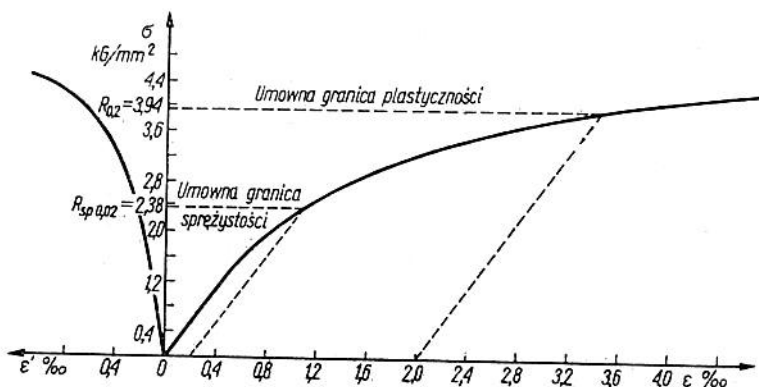
Stąd wytrzymałość na rozciąganie materiału $R_m = \frac{P_r}{A} = \frac{274}{70} = 3,914 \text{ kG/mm}^2$.

Wyniki pomiarów jednej z próbek serii II podano na wykresie rozciągania przedstawionym na rys. 6.19. Otrzymujemy odpowiednio:

$$R_{sp0,02} = 2,38 \text{ kG/mm}^2 \text{ oraz } R_{0,2} = 3,94 \text{ kG/mm}^2$$

Obliczenia E i ν zawarte są w tabl. 6.1. Mamy w tym przypadku:

$$E = 2692 \text{ kG/mm}^2 \text{ oraz } \nu = 0,24.$$



Rys. 6.19. Typowy wykres rozciągania próbki serii II z materiału CuSn10 (brąz cynowy)

Tablica 6.1. Obliczenie E i ν przykładowej próbki serii II

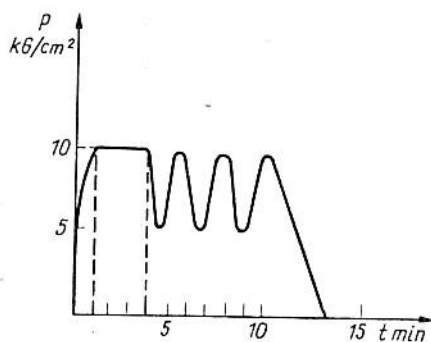
σ	Odkształcenia jednostkowe												$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ kG/mm}^2$			$\nu = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon}$		
	Obciążenie 1				Obciążenie 2				Obciążenie 3									
	ε	ε'	ε	ε'	ε	ε'	ε	ε'	ε	ε'	Obc. 1	Obc. 2	Obc. 3	Obc. 1	Obc. 2	Obc. 3		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	—	—	—	—	—	—		
0,159	0,00005	0,00001	0,00006	0,00002	0,00002	0,00006	0,00002	0,00006	0,00002	0,00002	3180	2650	2650	0,200	0,333	0,200		
0,319	0,00012	0,00003	0,00012	0,00003	0,00012	0,00012	0,00003	0,00012	0,00003	0,00003	2658	2658	2658	0,250	0,250	0,250		
0,478	0,00018	0,00004	0,00018	0,00005	0,00018	0,00018	0,00005	0,00018	0,00004	0,00004	2656	2656	2656	0,222	0,278	0,222		
0,638	0,00023	0,00006	0,00024	0,00006	0,00024	0,00024	0,00006	0,00024	0,00005	0,00005	2774	2658	2658	0,261	0,250	0,208		
0,797	0,00029	0,00007	0,00030	0,00007	0,00030	0,00030	0,00007	0,00030	0,00006	0,00006	2748	2657	2657	0,241	0,233	0,200		
0,957	0,00036	0,00009	0,00037	0,00009	0,00036	0,00036	0,00009	0,00036	0,00008	0,00008	2658	2586	2658	0,250	0,243	0,222		
1,116	0,00041	0,00010	0,00042	0,00010	0,00042	0,00042	0,00010	0,00042	0,00010	0,00010	2722	2657	2657	0,244	0,238	0,238		
1,276	0,00047	0,00012	0,00048	0,00012	0,00047	0,00047	0,00012	0,00047	0,00011	0,00011	2715	2658	2715	0,255	0,250	0,234		
średnia											2764	2647	2664	0,240	0,259	0,222		
$E = \frac{2764 + 2647 + 2664}{3} = 2692 \text{ kG/mm}^2$											$\nu = \frac{0,240 + 0,259 + 0,222}{3} = 0,240$							

6.6. Metoda określania odkształceń wkładów filtracyjnych

6.6.1. Specyfika pracy wkładów filtracyjnych

Zaprojektowanie wkładu filtracyjnego o optymalnych parametrach przepływowych i wytrzymałościowych wymaga dokładnej znajomości warunków pracy urządzenia i mechanicznych własności materiału, z którego jest on wykonany. Ponieważ analiza warunków pracy urządzeń płynowych przedstawiona została wcześniej, zajmiemy się tutaj jedynie zagadnieniem określenia własności mechanicznych wkładów filtracyjnych. Wykonanie odpowiednich badań jest niezbędne ze względu na trudności jakie występują przy próbach teoretycznego rozwiązania zagadnienia. Trudności te są związane przede wszystkim z niejednorodnością materiału i skomplikowanym charakterem zmian ciśnienia, nie zawsze możliwym do uwzględnienia w obliczeniach. Otrzymanie możliwie mało skomplikowanych wzorów, przydatnych przy wstępnych pracach konstruktorskich, wymaga przyjęcia uproszczonego modelu wkładu filtracyjnego. Wszystkie te czynniki w sumie powodują przybliżony charakter wyników otrzymanych na podstawie obliczeń teoretycznych i konieczność ich sprawdzenia w praktyce.

W przedstawionej tutaj metodzie badań przyjęto, że spadek ciśnienia na elemencie filtrującym narasta stopniowo, bez gwałtownych „uderzeń”, a ewentualne pulsacje ciśnienia o wysokiej częstotliwości (wynikające np. z pracy pompy) mają małe amplitudy. Uwzględniono natomiast wahania ciśnienia o dużych amplitudach i niskiej częstotliwości. Typowy przebieg zmian ciśnienia w czasie prób wytrzymałościowych przedstawiono na rys. 6.20.



Rys. 6.20. Typowy przebieg zmian ciśnienia w czasie przyjęty do badań wytrzymałościowych wkładów filtracyjnych

Można przyjąć, że przebieg taki dobrze oddaje warunki pracy filtru w układzie rzeczywistym.

Dla uzyskania dokładniejszych informacji o wytrzymałości wkładów, w badaniach należy uwzględnić także nieprawidłowości wykonania wkładów, które mogą ująć uwadze nawet wnikliwej kontroli. Do badań należy użyć dostatecznej liczby wkładów, tak aby można było opracować wyniki statystycznie. Przyjmuje się, że błędy łączenia obrzeży wkładu są wadą dyskwalifikującą, ponieważ przy spadku ciśnienia części składowe wkładu rozchylają się, a powstająca szczelina w sposób niedopuszczalny ogranicza dokładność filtrowania. Innymi wadami wykonania, jakie mogą ująć uwadze kontroli, jest zbytne utlenienie materiału wkładów metalowych oraz inne wady polegające na niedokładnym montażu części wkładu, zmniejszające jego wytrzymałość.

W badaniach wytrzymałościowych należy zwracać uwagę na dobór punktów pomiarowych, tak aby uzyskać pełną informację o zachowaniu się wkładu obciążonego spadkiem ciśnienia. Należy kierować się przy tym wynikami obliczeń teoretycznych, które wskazują krytyczne, najbardziej podatne na odkształcenia punkty wkładu.

Jak już wspomniano, porowate elementy filtracyjne mają znacznie mniejszą wytrzymałość niż materiał, z którego są one zbudowane. Główna przyczyna zmniejszenia wytrzymałości wynika przede wszystkim z osłabienia przekroju zależnego od porowatości oraz od kształtu porów, a ponadto, dodatkowy wpływ ma również proces technologiczny. Granica plastyczności i wytrzymałości zależna jest oczywiście od materiału, z którego zbudowano filtr. Przy jednakowej porowatości, wytrzymałość spiekanych, stapianych oraz tkanych elementów filtracyjnych zwiększa się w miarę zmniejszania się wymiarów ziarn, włókien, drutu (zwiększa się jednostkowa ilość punktów styku) oraz na ogół zwiększania temperatury obróbki. Istnieje obszerna literatura, w której opisano badania teoretyczne i doświadczalne wytrzymałości wyrobów spiekanych w ogóle, mniej natomiast są opisane badania wytrzymałości filtrów uzyskiwanych metodą metalurgii proszków. Wynika to głównie z dwu przyczyn: filtry nie pracują przeważnie pod dużymi obciążeniami mechanicznymi oraz rozwój technologii materiałów o dużej porowatości jest zbyt powolny w porównaniu z innymi wyrobami tego rodzaju.

Na podstawie własnych badań oraz danych z literatury można stwierdzić, że np. wytrzymałość na rozciąganie materiałów o dużej porowatości (30—50⁰/n) zawiera się w granicach od 50 do 1000 kG/cm², i zależy, jak już wspomniano o tym, od materiału, technologii, kształtu i wymiarów produktu wyjściowego. Jednostkowe

wydłużenie wynosi od 0,5 do 5⁰/₀. Kształt wkładu filtracyjnego określa dopuszczalne spadki ciśnienia. Na przykład niektóre wkłady firmy Fairey wytrzymują spadki ciśnienia bez szkody dla wkładu do 100 kG/cm², niektóre filtry ze stali nierdzewnej do 500 kG/cm² lub nawet więcej.

Wytrzymałość na ścinanie jest większa od wytrzymałości na rozciąganie 2 do 4 razy dla filtrów wykonanych z proszku brązu w zakresie wielkości ziarn od 40 do 600 μm.

Istnieje wiele teoretycznych i empirycznych zależności określających granicę wytrzymałości filtrów spiekanych. Niektóre z nich uzależniają wytrzymałość materiału porowatego od wytrzymałości materiału wyjściowego, inne wprowadzają współczynniki osłabienia przekroju, bądź niejednorodności struktury. Wszystkie jednak opierają się na badaniach rzeczywistych materiałów w celu wyznaczenia współczynników doświadczalnych.

Najbardziej przydatnymi z punktu widzenia eksploatacji filtrów są badania umożliwiające określenie dopuszczalnego spadku ciśnienia nie powodującego trwałych skutków w postaci odkształcenia lub zniszczenia wkładu filtracyjnego. Jest rzeczą oczywistą, że obciążenie elementu filtrującego wzrasta w miarę zatykania się porów, i z upływem czasu pracy filtra spadek ciśnienia zwiększa się wielokrotnie w porównaniu z początkiem pracy.

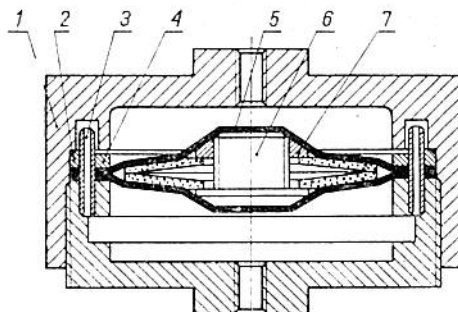
6.6.2. Stoisko do badania wytrzymałości wkładów filtracyjnych

W celu określenia wytrzymałości wkładów filtracyjnych wykorzystuje się stoisko zawierające zbiornik ciśnieniowy z manometrem, wewnątrz którego umieszcza się wkład filtracyjny w specjalnej oprawce. Najczęściej cały wkład filtracyjny lub segment wkładu pokrywa się nieprzepuszczalnym lakierem albo też umieszcza się w komorze wypełnionej sproszkowaną gumą. Najlepsze wyniki uzyskuje się jednak przez zastosowanie osłony z płaszcza gumowego obciążającej badany element filtracyjny. Przykład rozwiązania komory ciśnieniowej i oprawki z zabezpieczeniem warstwą jednolitej gumy pokazano na rys. 6.21, na którym również przedstawiono sposób przygotowania do badań segmentu metalowego filtra spiekane.

Konstrukcja taka umożliwia oględziny lub pomiary odkształceń elementu bez jego demontażu, a ponadto zapewnia szczelność okrycia nie dopuszczając w ten sposób do przedostania się cieczy do przestrzeni wewnętrznej wkładu. Po zalaniu cieczą w naczyniu ciśnieniowym oprawki z wkładem filtracyjnym można łączyć naczynie z prasą do cechowania manometrów i ustalać wartości ciś-

nień oraz każdorazowo po wyjęciu oprawki mierzyć odkształcenia w oznaczonym miejscu.

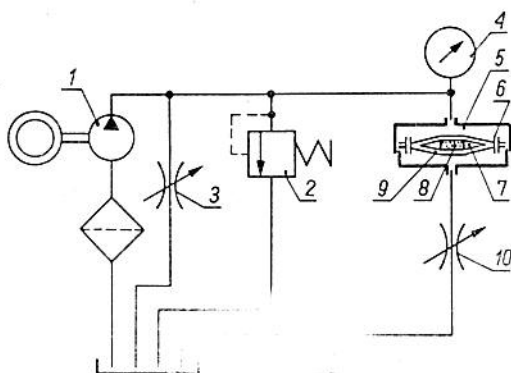
Bardziej uniwersalnym rozwiązaniem badań wytrzymałości wkładu jest wykorzystanie typowej stacji zasilania hydraulicznego. Umożliwia to realizację przebiegu ciśnienia wg dowolnego programu w czasie. Układ pomiarowy składa się ze źródła zasilania



Rys. 6.21. Schemat konstrukcyjny komory ciśnieniowej do badań wytrzymałościowych wkładów filtracyjnych talerzowych; 1 — obudowa górna i dolna, 2 — pierścień uszczelniający, 3 — kołek ustalający, 4 — pierścień dociskowy, 5 — przepona gumowa, 6 — śruba, 7 — nakrętka

oraz komory ciśnieniowej. W wielu przypadkach komorą ciśnieniową może być obudowa filtra wysokociśnieniowego.

Na schemacie stoiska pomiarowego przedstawiona (rys. 6.22) pompa 1 z zaworem przelewowym 2 stanowi źródło ciśnienia. Przepływ jest bocznikowany nastawnym zaworem 3. Od stopnia jego otwarcia zależy wartość ciśnienia w układzie. Przepływ oleju



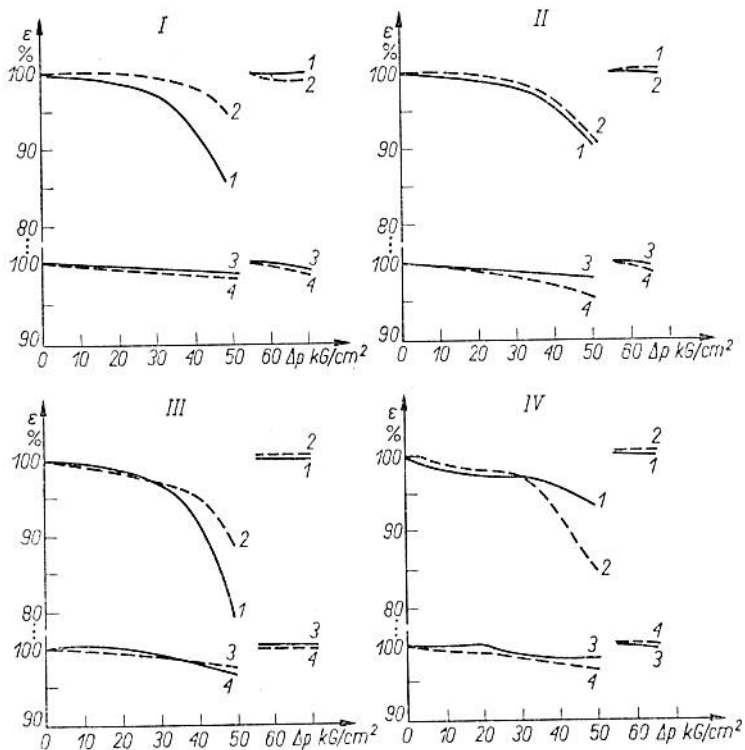
Rys. 6.22. Schemat stoiska do badań wytrzymałościowych wkładów filtracyjnych

przez komorę 5 umożliwiającą cylindryczne kołki 6. Dokładną regulację ciśnienia w komorze zapewnia zawór nastawny 10. Badany wkład filtracyjny 7 wraz z wkładką porowatą 8 jest zamknięty między dwiema przeponami gumowymi 9. Wobec dużej powierzchni przepływowej kołków 6 (dużej w stosunku do przekroju przewodów zasilających) można założyć, że ciśnienie w całej objętości komory 5 ma wartość równą wskazywanej przez manometr 4. Przepony 9 dokładnie obciskają wkład aby w czasie próby nie przedostał się między nie olej. Wobec małej objętości powietrza zamkniętego między przeponami, zmiany ciśnienia spowodowane zmniejszaniem się objętości są pomijalne (zwłaszcza gdy stosuje się porowatą wkładkę 8). Badany wkład jest więc ściskany z obydwu stron siłą proporcjonalną do ciśnienia w komorze 5.

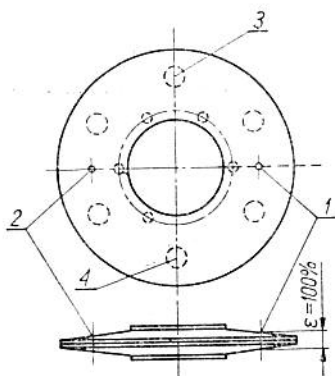
6.6.3. Przebieg próby

Przebieg badań jest następujący. Po całkowitym otwarciu zaworów 3 i 10 włącza się pompę 1. Ciśnienie bowiem w układzie wzrasta gwałtownie (do ok. 5 kG/cm²) w wyniku oporów wewnętrznych w układzie. Otwarcie zaworu 10 umożliwia odpowietrzanie komory 5 i przewodów. W chwili nastąpienia wypływu czynnika z przewodu 11 zamyka się zawór 10 i zaworem 3 nastawia odpowiednią wartość ciśnienia w komorze 5. Ciśnienie stałe należy utrzymywać w komorze przez okres czasu co najmniej 2 min, a następnie wprowadzać zmiany wahadłowe ciśnienia przez szybkie otwieranie i zamykanie zaworu 10. Następnie wkład wyjąć z komory i wykonywać pomiary jego grubości. Postępowanie to powtarzać dla każdego wkładu i każdej wartości ciśnienia.

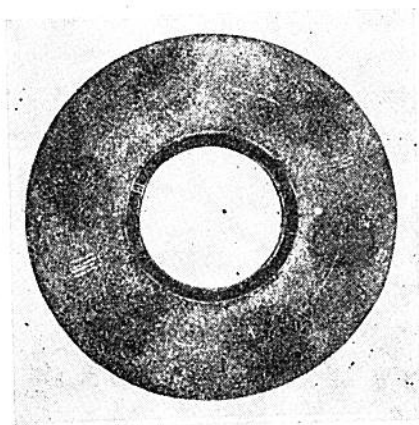
Przykładowe wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 6.23. Dla uzyskania wyników bardziej poglądowych, ugięcia wkładu wyrażono w procentach grubości wkładu nieuszkodzonego. Wyniki przedstawione na rys. 6.23 dotyczą pomiarów wykonywanych w punktach 1 i 2 segmentu wkładu między słupkami podpierającymi oraz w punktach 3 i 4 na słupkach podpierających (rys. 6.24). Przez powtarzanie pomiarów na obu przeciwnych stronach wkładu można wyciągnąć wnioski dotyczące jednorodności materiału, weryfikujące wyniki badań własności mechanicznych materiału. Dla zapewnienia powtarzalności pomiarów, na każdym z badanych wkładów należy zaznaczyć punkty pomiarowe wraz z ich numerami (rys. 6.25). Pomiary powtarzano trzykrotnie dla każdego punktu, a do ostatecznych obliczeń przyjmowano ich wartość średnią. Jako przyrządu pomiarowego użyto śruby mikrometrycznej o zakresie 0÷25 mm i dokładnością 1/100 mm przy 20°C.



Rys. 6.23. Przykładowe wyniki badań czterech segmentów talerzowego filtra spiekane (I—IV). Dla ciśnień 0 i 50 kg/cm^2 przyjęto $\varepsilon = 100\%$

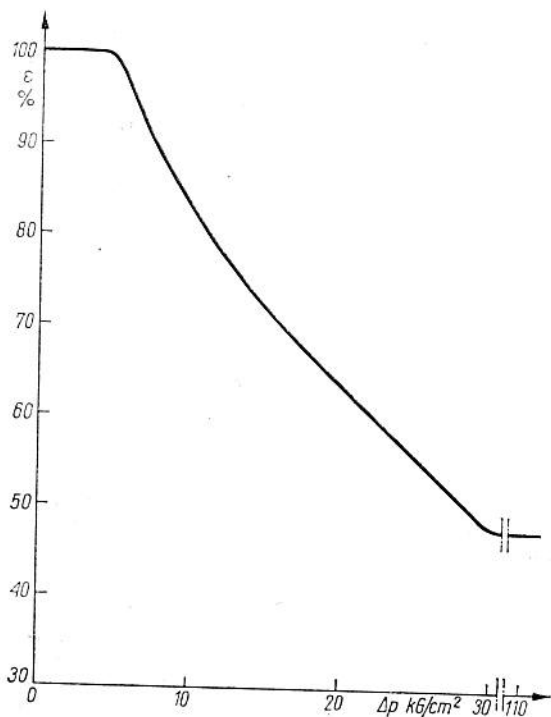


Rys. 6.24. Miejsce pomiarów odkształceń segmentu wkładu podczas badań wytrzymałościowych

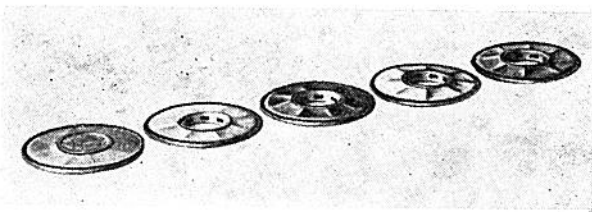


Rys. 6.25. Widok odkształconego segmentu wkładu filtracyjnego z zaznaczeniem punktów pomiarowych

Bardziej wyraźnie widoczne jest odkształcenie filtrów siatkowych. Na rys. 6.26 pokazano typowy przebieg krzywej odkształceń plastycznych segmentów talerzowych stosowanych w budowie filtra FS2-16G-16DM, a na rys. 6.27 — kolejne fazy odkształceń przy wzroście ciśnienia. Badania prowadzono w sposób analogiczny jak poprzednio.



Rys. 6.26. Krzywa odkształceń plastycznych segmentu talerzowego filtra siatkowego



Rys. 6.27. Widok wkładów po próbach wytrzymałościowych. W pierwszym wkładzie z lewej pokazano umocowaną wkładkę porowatą

6.6.4. Wnioski dotyczące wytrzymałości i optymalnych warunków pracy wkładów spiekanych i siatkowych

Wyniki badań wytrzymałościowych wkładów wraz z wynikami badań własności mechanicznych materiałów, umożliwiają wyciągnięcie wniosków dotyczących poprawy parametrów konstrukcyjnych filtrów. Badania wytrzymałości wkładów potwierdzają praktycznie duży rozrzut parametrów mechanicznych materiału spiekanego z ziarn. Część wkładów, np. wkłady opisane wykresami II, III i IV na rys. 6.23 w szerokim zakresie spadków ciśnienia ($0 \div 35 \text{ kG/cm}^2$) zachowuje się jak wykonane z materiału jednorodnego, a rozbieżności w wielkości odkształceń dają się zauważyć dopiero przy większych obciążeniach, inne natomiast (zwłaszcza wkład I) praktycznie już od spadków ciśnienia zawartych w przedziale $0 \div 5 \text{ kG/cm}^2$ wykazują dużą niejednorodność i wyraźnie różne własności mechaniczne w dwu przeciwległych punktach pomiarowych. Należy zauważyć, że w przypadku osiadania wkładu w punktach podparcia słupkami wpływ niejednorodności jest pomijalny. Podobne zjawisko zauważono na wewnętrznym obrzeżu wkładu. Umożliwia to wysunięcie wniosku, że wpływ niejednorodności jest wyraźniejszy w przypadku cieńszych ścianek wkładu.

Zgodnie z wynikami badań obciążenie metalowego wkładu hydraulicznego spadkiem ciśnienia od 5 kG/cm^2 , nie powoduje odkształceń trwałych. Można przyjąć, że wkłady wykonane poprawnie, tzn. nie utlenione, nie zmieniają wymiarów przy spadku ciśnienia do 10 kG/cm^2 . Natomiast wada wykonania w postaci nadmiernego utlenienia materiału wkładu powoduje gwałtowne „osiadanie” wkładu o ok. 30% grubości początkowej, a następnie zmiany podobne do zachodzących w pozostałych wkładach (wkład IV). Należy więc uznać zbytne utlenienie materiału wkładu za wadę dyskwalifikującą wkład.

Odkształcenia w punktach pomiarowych 1 i 2 są maksymalne, równe $15 \div 20\%$ grubości początkowej wkładu przy spadku ciśnienia wynoszącym $50 \div 55 \text{ kG/cm}^2$. Odkształceniom tym odpowiada zetknięcie się ścianek obydwu części składowych wkładu. Dalsze zwiększanie spadku ciśnienia nie wpływa wyraźnie na odkształcenia wkładu w punktach 1 i 2, powoduje natomiast nieznaczne „osiadanie” materiału wkładu w punktach 3 i 4 oraz na obrzeżu wewnętrznym. Stwierdzono przy tym, że przy spadkach ciśnienia wynoszących $40 \div 50 \text{ kG/cm}^2$ następuje ścinanie złącza lutowanego na kołkach podpierających. Ponieważ do tych wartości spadku ciśnienia nie zauważono wyraźnej różnicy między pracą wkładów z lutowanymi podpórkami (wkłady III, IV i V) a pracą wkładów bez lutowanych podpórek (wkłady I i II) można przyjąć, że brak lutowania wkładów na podpórkach nie stanowi wady wykonania.

Dla określenia wpływu odkształceń mechanicznych wkładów na zmiany charakterystyk hydraulicznych filtru wykonano pomiary charakterystyk hydraulicznych dwóch wkładów zniekształconych spadkiem ciśnienia równym 110 kG/cm^2 . Charakterystyki te porównano z charakterystykami tych samych wkładów, przed próbami wytrzymałościowymi. Stwierdzono, że kształt charakterystyk wkładów odkształconych zbliża się wyraźnie do paraboli. Ponieważ natężenie przepływu nie zmienia się wyraźnie, a zmiana powierzchni przepływowej wkładów jest znaczna (w wyniku stykania się ścianek przeciwległych) można powiedzieć, że następuje zwiększanie wymiarów porów, ujemnie wpływające na dokładność filtrowania. Trwałe odkształcenia wkładu przekraczające 10% grubości początkowej stanowią wadę dyskwalifikującą wkład.

Można postulować dowolne zmniejszenie grubości ścianek wkładów filtrujących w przypadku zastosowania zaworów przelewowych, otwieranych przy spadku ciśnienia odpowiadającym nie więcej niż 10% odkształcenia wkładu. Wyniki pomiarów wytrzymałości siatkowych wkładów filtrujących umożliwiają wyciągnięcie następujących wniosków.

Spadki ciśnienia na filtrze do 5 kG/cm^2 należy uznać za dopuszczalne, nie powodujące widocznych uszkodzeń wkładów.

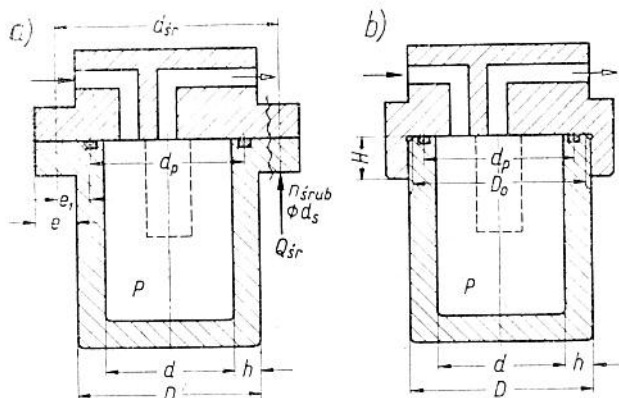
Bardzo duże odkształcenia plastyczne wkładów nie powodują wyraźnych zmian efektywności filtrowania, np. w wyniku powiększenia wymiarów oczek czy innych deformacji siatki. Daje się natomiast zauważyć wpływ odkształcenia pierścienia zaciskającego wewnętrzne obrzeże siatki. Dlatego należy stosować pomiędzy poszczególnymi wkładami filtrującymi przekładki z miękkiej gumy i zapewnić odpowiednie zaciśnięcie wkładów. W przeciwnym przypadku, w wyniku odkształcenia pierścienia, mogą powstać szczeliny o wysokości dochodzącej do ok. $0,1 \div 0,3 \text{ mm}$.

W filtrach siatkowych występuje duża powtarzalność wyników dla wszystkich wkładów. Nie występują w tym przypadku kłopoty z niejednorodnością materiału i trudności z określeniem dopuszczalnych spadków ciśnienia na wkładach (z którymi spotykaliśmy się przy spiekach metalowych). Stosowanie siatek umożliwiło więc otrzymanie wkładu filtrującego o bardzo dobrych parametrach wytrzymałościowych.

6.7. Obliczenia obudowy filtrów ciśnieniowych

Oprócz obliczeń wytrzymałościowych wkładów filtracyjnych, istotne znaczenie ma dobór przekrojów obudowy filtrów ciśnieniowych. Obudowa składa się najczęściej z dwu elementów roz-

łącznych: pokrywy (korpusu) i osłony (odstojnika). Na rys. 6.28 przedstawiono dwa rodzaje obudowy filtrów ciśnieniowych różniących się między sobą sposobem połączenia pokrywy i osłony. Na rys. 6.28a pokazano obudowę z połączeniem pokrywy i osłony



Rys. 6.28. Obudowa filtru ciśnieniowego: a) z połączeniem śrubowym, b) z połączeniem gwintowym

śrubami, a na rys. 6.28b — obudowę, w której pokrywa i osłona są łączone gwintem. Na rysunkach zaznaczono wymiary charakteryzujące wielkości geometryczne wykorzystywane w obliczeniach.

Dla połączenia śrubowego i gwintowego najmniejsza grubość ścianki h na rozerwanie jest określona na podstawie naprężeń występujących w osłonie.

Grubość ścianki h osłony z warunkiem na rozerwanie

$$h \geq \frac{pd}{2k_r} \quad (6.66)$$

gdzie: p — ciśnienie wewnątrz osłony, k_r — naprężenia dopuszczalne na rozciąganie.

Dla połączenia śrubowego należy obliczyć grubość ścianki h osłony ze względu na występujące zginanie kołnierza. Grubość ścianki h osłony z warunkiem na zginanie

$$h \geq \sqrt{\frac{1.5pd_p e_1}{k_g}} \quad (6.67)$$

gdzie: k_g — naprężenie dopuszczalne na zginanie.

Grubość ścianki h osłony z warunkiem na ścinanie

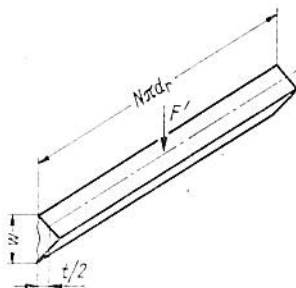
$$h \geq \frac{pd_p}{4k_t} \quad (6.68)$$

gdzie: k_t — naprężenia dopuszczalne na ścinanie.

Jeżeli $A_{sr} = \pi d_s^2/4$ oznaczymy przekrój jednej śruby oraz całkowitą siłę rozciągającą $F' = p \pi d_p^2/4$, to liczbę śrub o średnicy d_s otrzymamy ze wzoru

$$n = \frac{F'}{k_{r\dot{s}r} A_{sr}} = \frac{p d_p^2}{d_s^2 k_{r\dot{s}r}} \quad (6.69)$$

W celu wyznaczenia wytrzymałości połączenia gwintowego wykorzystamy schemat gwintu przedstawiony na rys. 6.29. Gwint pod wpływem obciążenia może ulec zniszczeniu przez złamanie na



Rys. 6.29. Schemat do obliczenia wytrzymałościowego gwintu

skutek zginania, ścinania lub zużycia. Długością pracującą gwintu nazywamy tę liczbę N zwojów gwintu, która tworzy połączenie zazębiające się na wysokość skreślenia H .

Stąd liczba pracujących zwojów gwintu wyniesie

$$N \geq \frac{4F'}{\pi(D^2 - D_o^2) p_{dop}} \quad (6.70)$$

gdzie: D — średnica zewnętrzna gwintu i osłony, D_o — średnica otworu pokrywy, p_{dop} — dopuszczalne naciski działające na obudowę filtra.

Naciski p_{dop} przyjmuje się następujące: dla żeliwa 120÷250 kG/cm, dla stali zależnie od gatunku 200÷600 kG/cm², dla stopów lekkich 60÷160 kG/cm².

Jeżeli h jest długością skoku gwintu, to wysokość skreślenia $H = Nh$.

Osłona filtra stanowi najczęściej rodzaj drążonej śruby obciążonej siłami rozciągającymi. Mając wzór na przekrój rdzenia osłony $F_r = (d_r^2 - d^2)/4$ i na naprężenie ścinające $\sigma = F'/F_r$, otrzymamy średnicę rdzenia

$$d_r \approx 1,15 \sqrt{\frac{F'}{k} + d^2} \quad (6.71)$$

We wzorze powyższym naprężenia dopuszczalne k mogą przyjmować różne wartości (k_r , k_j , k_{re} , k_e , k_{ej}) zależnie od charakteru obciążenia działającego na obudowę filtra ciśnieniowego.

Rozdział 7. REGENERACJA POROWATYCH WKŁADÓW FILTRACYJNYCH

7.1. Charakter osadu na filtrze

Wybór sposobów regeneracji filtrów jest określony przede wszystkim przez ilość i skład chemiczny osadzających się zanieczyszczeń oraz przez konstrukcję wkładu filtracyjnego. Zanieczyszczenia składają się zarówno z cząstek wychodzących z urządzeń zasilających, jak również z cząstek powstałych w procesie eksploatacji urządzenia. Skład chemiczny osadu zależy od własności ośrodka przepływającego. W skład tego ośrodka wchodzi *zanieczyszczenia metalowe, nieorganiczne i organiczne*.

Wszystkie zanieczyszczenia osadzające się na filtrze można też podzielić na *zanieczyszczenia stałe* i *zanieczyszczenia typu reologicznego*. Zanieczyszczenia stałe występują w postaci bardzo drobnego pyłu bądź też w postaci cząstek o dość dużych rozmiarach, np. wiórów, lakierów, rdzy itd. Zanieczyszczenia stałe o dużych rozmiarach nie sprawiają większych trudności w ich usunięciu, natomiast zanieczyszczenia drobne wnikają głęboko w pory i ich usunięcie z wkładu filtrującego sprawia duże kłopoty.

Zanieczyszczenia nieorganiczne najczęściej występują w postaci tlenków, krzemianów, piasku. Zwykle mają one dość duże rozmiary i osadzają się na powierzchni elementu filtrującego. Usunięcie ich jest możliwe przez zastosowanie regeneracji mechanicznej.

Zanieczyszczenia organiczne składają się z bardzo drobnych cząstek i dlatego wnikają dość głęboko w pory. Usuwanie ich z czynnika roboczego jest dokonywane przy zastosowaniu materiałów filtracyjnych wgłębnym bardzo dokładnym oczyszczaniu. Osad z tych zanieczyszczeń powoduje przyleganie cząstek stałych do elementu filtrującego. Oprócz tego ściśle ich przyleganie do powierzchni porów może prowadzić do powstania reakcji chemicznych, co przy obecności zanieczyszczeń stałych o różnym składzie chemicznym może spowodować zmiany we własnościach materiału filtrującego. Niszczące działanie chemiczne może być zwiększone

również przez wzrost temperatury płynu roboczego. Dodatkowy ujemny wpływ może wywierać światło, działanie katalityczne niektórych metali, zmiany chemiczne zanieczyszczeń w czasie, zasadowość lub kwasowość cieczy roboczej itp. Te ostatnie czynniki mają bardzo duże znaczenie przy filtrowaniu olejów zawierających różne dodatki mające na celu poprawę własności fizycznych. Należy zwrócić uwagę na to, że istotne znaczenie ma czas, w którym zanieczyszczenia znajdują się na elemencie filtrującym. Musi to być brane pod uwagę nawet w przypadku, gdy ilość osadu nie osiągnie wartości dopuszczalnej.

Innym ważnym aspektem jest niebezpieczeństwo występujące przy stosowaniu tego samego filtra do oczyszczania różnych płynów. Dopuszczalność takiego rozwiązania musi być dokładnie określona przez badanie chemiczne.

Podstawowe własności materiałów filtracyjnych określone badaniami laboratoryjnymi należy sprawdzić podczas eksploatacji. Wyróżnia się dwa podstawowe modele osadzania się zanieczyszczeń w materiale filtracyjnym. W zależności od charakteru filtrowania, osadzające się cząstki powodują pełne zatykanie porów lub powstanie warstwy na powierzchni filtra. Oba te modele mają zastosowanie w większości przypadków konstrukcyjnych filtrów płynów roboczych, które pracują zarówno włącznie jak i powierzchniowo.

Zatrzymywanie zanieczyszczeń przez filtry w każdym przypadku powoduje zmniejszenie się efektywnego przekroju przepływowego, a w konsekwencji — zmniejszenie natężenia przepływu i zwiększenie odpowiadającego mu spadku ciśnienia. Możliwości teoretyczne oceny tych zmian są bardzo ograniczone ze względu na występowanie wielu parametrów filtrowania o charakterze przypadkowym oraz ze względu na poważne trudności analitycznego ujęcia i śledzenia procesu filtrowania. Dlatego praktycznymi wskazaniemi niezbędnymi do oceny dynamiki filtrowania są rejestrowane na bieżąco natężenia przepływu i ciśnienia w procesie filtrowania.

Charakter osadzania się cząstek zanieczyszczeń przy filtrowaniu gazów zależy nie tylko od ich wymiarów, ale i od ich własności elektrycznych. Stwierdzono na przykład, że pył Al, Fe, Zn oraz tlenki tych metali, jak również niektóre związki Mg, Na, w strumieniu powietrza ładują się ujemnie, zaś pył węgla, piasku i siarki — dodatnio. Znak ładunku pyłu określa jego własności chemiczne, stopień jonizacji gazu, wielkość i charakter powierzchni przewodów itp. Znak ładunku elektrycznego pyłu wpływa na sposób osadzania się jego cząstek lub wnikania włącznie materiału porowatego, a zatem na stopień trudności jego usunięcia. Z związku z tym, że dynamiczne aspekty filtrowania określają czas pracy

filtru, zaś dynamika filtrowania jest stosunkowo trudna do precyzyjnego opisu analitycznego, zatem jedynym kryterium wskazującym na konieczność regeneracji filtru jest maksymalny dopuszczalny spadek ciśnienia dla określonego natężenia przepływu.

Nie wglębiając się w szczegóły dotyczące zarówno charakteru osadzania się zanieczyszczeń jak i usuwania ich z labiryntów porów elementu filtrującego, można stwierdzić, że po osiągnięciu dopuszczalnego spadku ciśnienia, a więc zmniejszenia się efektywnej powierzchni przepływu, należy usunąć powstałą przeszkodę w sposób umożliwiający dalszą eksploatację wkładu filtracyjnego.

7.2. Proste metody regeneracji porowatych wkładów filtracyjnych

Na podstawie dotychczasowych prac w dziedzinie regeneracji metalowych filtrów spiekanych i sit filtracyjnych (a więc materiałów filtracyjnych o stosunkowo wysokiej cenie) można stwierdzić, że istnieją możliwości znacznego udoskonalenia tego procesu przez wykorzystanie różnych zjawisk fizycznych i chemicznych.

Proces regeneracji powinien być prowadzony przy użyciu takich urządzeń, które zapewnią prostą i bezpieczną obsługę oraz korzystne wskaźniki ekonomiczne.

Na obecnym etapie pełna automatyzacja procesu regeneracji nie jest jeszcze w pełni możliwa, gdyż nie uporano się z wieloma występującymi tu zagadnieniami. Dotyczy to głównie filtrów hydraulicznych.

Obecność filtrów dokładnego oczyszczania w hydraulicznych układach sterowania umożliwia uzyskanie korzyści jednoznacznie potwierdzonych danymi z eksploatacji, co uzasadnia potrzebę coraz powszechniejszego ich stosowania; są to jednak na ogół urządzenia drogie. Fakt ten określa znaczenie procesu regeneracji, umożliwiającego wielokrotne wykorzystanie wkładu filtracyjnego. Dotyczy to przede wszystkim metalowych wkładów spiekanych, gdyż koszt ich wyprodukowania jest porównywalny z kosztami pozostałych elementów układu hydraulicznego, a wysokie własności mechaniczne umożliwiają wielokrotne zabiegi regeneracyjne bez widocznego pogarszania zdolności filtracyjnej.

Badania nad przedstawionym wyżej zagadnieniem są prowadzone w wielu ośrodkach, a ich wynikiem jest wiele wysoko-specjalizowanych urządzeń regeneracyjnych, zapewniających wysoką skuteczność i opłacalność procesu.

Stan krajowej produkcji filtrów średnio- i wysokodokładnego oczyszczania wymaga stosowania raczej tych metod regeneracji, przy których nie trzeba stosować kosztownych i wąsko wyspecjalizowanych urządzeń. Metody te powinny być ponadto proste i łatwe w stosowaniu.

Wśród wielu metod regeneracji elementów filtrujących należy wyróżnić metody, w których wykorzystuje się przede wszystkim regenerację chemiczną (rozpuszczanie zanieczyszczeń) i termochemiczną (wypalanie gorącym gazem i wyżarzanie z oddziaływaniem chemicznym). Interesującymi z punktu widzenia praktycznych zastosowań są metody mechaniczne (odśrodkowe, odśrodkowo-wibracyjne, ultradźwiękowe) oraz areo- i hydromechaniczne (zmywanie, wymywanie) lub połączenie tych metod.

Filtry zawierające taką ilość zanieczyszczeń, która powoduje powstanie dużych oporów przepływu płynu roboczego określonego ciśnieniem „zatkania” filtru, mogą być regenerowane, jeśli względy konstrukcyjne elementu filtrującego oraz ekonomiczne uzasadniają taki zabieg.

W obecnym stanie produkcji większości metalowych elementów filtrujących jest uzasadnione oczyszczanie filtrów, tym bardziej, że metalowe filtry umożliwiają wielokrotne powtórzenie zabiegu regeneracji. Oczywiście, najbardziej jest uzasadniona taka metoda regeneracji, przy której zastosowaniu można usunąć wszystkie zatrzymane zanieczyszczenia w prosty i tani sposób, bez pogorszenia własności elementu filtrującego (a więc uzyskanie początkowych parametrów przepływowych i geometrycznych filtru, własności chemicznych, mechanicznych itp.).

Na podstawie powyższych stwierdzeń można ogólnie określić warunki jakie muszą być spełnione, aby uzasadniona była celowość regeneracji wkładów filtracyjnych:

- jeśli konstrukcja wkładu filtracyjnego umożliwia przeprowadzenie zabiegu jego oczyszczania;
- jeśli regeneracja umożliwia odtworzenie własności filtru, tak aby możliwa była dalsza jego eksploatacja;
- jeśli regeneracja odbywa się bez kłopotliwego demontażu;
- jeśli czas trwania regeneracji nie jest zbyt długi;
- jeśli proces oczyszczania nie pochłania zbyt dużej ilości czynnika regenerującego lub urządzenia do oczyszczania nie są zbyt drogie.

Metody regeneracji mogą być różnorodne. Poniżej omówiono niektóre z prostych najbardziej rozpowszechnionych metod.

Regeneracja mechaniczna. Możliwe jest oczyszczanie filtru „stacyczne”, w którym element filtrujący jest włożony do pojemnika z wirującą cieczą oczyszczającą (zmywanie zanieczyszczeń) lub ciecz jest poddana drganiom, np. ultradźwiękowym. W tym

przypadku ciecz regenerująca zachowuje stałą objętość lub możliwy jest jej powolny przepływ. Stosowane są metody zmywania cząstek zanieczyszczeń z powierzchni elementu filtrującego strumieniem cieczy skierowanej po stycznej do powierzchni elementu, a następnie przez przepuszczanie gazu w przeciwnym kierunku do przepływu roboczego. Innym sposobem, często stosowanym, jest przepuszczanie cieczy oczyszczającej lub gazu w kierunku przeciwnym do kierunku roboczego filtrowania.

Regeneracja termochemiczna. W grupie metod regeneracji termochemicznej występuje istotna operacja polegająca na chemicznym oddziaływaniu regenerujących płynów z zanieczyszczeniami. Jeżeli proces regeneracji odbywa się w temperaturze normalnej, wówczas mamy do czynienia z *regeneracją chemiczną*, jeśli zaś w temperaturach podwyższonych wtedy występuje *regeneracja termochemiczna*. W przypadku gdy działanie termiczne jest bardzo intensywne, np. wypalanie gorącym gazem, możemy mówić o *regeneracji termicznej*. Wśród spotykanych metod regeneracji chemicznej można wyodrębnić także operacje rozpuszczania zanieczyszczeń i wyżarzania z oddziaływaniem chemicznym.

Regeneracja hydroaerothermochemiczna. Sposób polega na przepuszczaniu przez wkład specjalnej mieszaniny cieczy z gazem; mieszanina ta ma podwyższoną temperaturę. Przepływ jest okresowo skokowy oraz ciągły. Wkład filtracyjny jest umieszczony między dwiema komorami (w szczególnym przypadku mogą to być konstrukcyjne przestrzenie filtra), w których wytwarza się różnicę ciśnień. Możliwe jest stosowanie wielu kombinacji: nadciśnienie, ssanie oraz nadciśnienie i ssanie wprowadzane przemiennie. Urządzenie jest wyposażone w filtry dokładnego oczyszczania cieczy myjącej i gazu. Główną zaletą tej regeneracji jest brak precyzyjnych elementów ruchomych, co zapewnia dużą niezawodność oraz znaczną ilość prostych wariantów pracy, co umożliwia powszechne stosowanie.

Poniżej podano zalecenia dotyczące oczyszczania filtrów, wypróbowane na wkładach ze spieków brązu oraz na sitach filtracyjnych, które w większym lub mniejszym stopniu spełniają wymagania w zakresie warunków regeneracji:

1) Skrobanie wkładu szczotką i przemywanie w rozpuszczalniku (nafta, benzyna nieetylizowana). Wady: możliwość uszkodzenia struktury wkładu (szczególnie sit filtracyjnych), mała skuteczność (niemożliwość usunięcia zanieczyszczeń z „wnętrza” materiałów pracujących głębiej), niebezpieczeństwo pożaru wskutek intensywnego parowania łatwopalnych cieczy regenerujących.

2) Włożenie sita filtracyjnego lub spieku we wrzący roztwór zasadowy (soda kaustyczna). Wady: niebezpieczeństwo dla pracow-

nika (konieczność wykonywania tych czynności w zakładzie specjalistycznym) oraz zwiększona korozja wkładu.

3) Wkłady zanurzone w kąpielach płynów, które zmieniają swoją objętość (np. emulsje czyszczące) pod wpływem wibracji ścianek naczynia. Wady: usunięcie małej części zanieczyszczeń, mała efektywność. Zastosowanie dodatkowo przepływu komplikuje proces regeneracji.

4) Przetrzymywanie wkładu w nw. kąpielach w temperaturze ok. 80°C przez 0,5 do 2 godzin. Kąpiel a) roztwór na 10 l wody w gramach, soda kaustyczna 350; kąpiel b) soda kaustyczna 65, potaż żrący KOH 230, szare mydło 30. Proces z zastosowaniem takich kąpeli zapewnia dobre odtłuszczenie wkładu.

Po wyjęciu wkładu spłukać go gorącym strumieniem wody i osuszyć w gorącym strumieniu czystego powietrza przez przepuszczanie powietrza w kierunku przeciwnym do kierunku filtracji. Mycie w strumieniu wody o temperaturze ok. 80°C przez zastosowanie „pistoletu” do wytwarzania pary o ciśnieniu około 5÷6 kG/cm² i „zabierania” podczas wypływu wody ułatwia usunięcie zanieczyszczeń stałych, resztek oleju z zewnętrznej powierzchni filtru, a przez jego podgrzanie powoduje samoczynne schnięcie wkładu po umyciu. Wady: zwiększona korozja i dość długi czas regeneracji.

5) Odtłuszczenie filtrów przez zanurzenie w wannie napełnionej roztworem (patrz tabl. 7.1) z zastosowaniem powolnego przepływu roztworów (temperatura 80÷95°C, czas kąpeli max. 2÷3

Tablica 7.1. Skład chemiczny roztworów do oczyszczania metalowych wkładów filtracyjnych

Składniki	Roztwór, zawartość składników w gramach na 1 l wody									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Soda kaustyczna	25	100	25	—	—	—	—	—	—	—
Węglan sodu Na ₂ CO ₃	35	—	31	—	4,5	7	18,5	20	10	10
Szkło wodne	1,5	—	10	15	—	—	8,5	8	—	—
Szare mydło	8,5	—	8	2	1	4	10	10	10	—
Dwuchromian potasowy	—	5	5	—	—	—	—	3	3	3
Potaż żrący KOH	—	—	—	—	1,3	3	—	—	—	—
Trójfosforan sodu Na ₃ PO ₄	—	—	—	—	1,5	—	—	—	—	—

godzin), „szczotkowanie” powierzchni, płukanie gorącą wodą i przedmuchiwanie oczyszczonym powietrzem. Cykl oczyszczania można powtarzać kilkakrotnie w celu polepszenia efektów skracając przy tym czas kąpieli każdorazowo do max. 0,5÷1 godziny. Wady: długotrwałość procesu, możliwość uszkodzenia wkładu filtracyjnego.

Przedstawione w punktach 1÷5 sposoby oczyszczania można stosować również do odtłuszczania różnych elementów urządzeń hydraulicznych wykonanych ze stali, żeliwa, stopów aluminium.

7.3. Chemiczne sposoby regeneracji filtrów

Chemiczne sposoby regeneracji wkładów filtracyjnych dotyczą tutaj głównie tych hydraulicznych urządzeń, które wykorzystują olej mineralny jako płyn roboczy. Metody opierają się na wykorzystaniu jednej z najprostszych operacji chemicznych, a mianowicie mycia wkładu filtracyjnego.

Dobór rozpuszczalników użytych do mycia musi zapewniać dokładne usunięcie zanieczyszczeń zarówno pochodzenia organicznego jak i mineralnego, bez zanieczyszczenia struktury filtra i bez obniżenia własności wytrzymałościowych.

Warunki optymalne procesu mycia (czas mycia, temperaturę oraz intensywność mieszania lub przepływu cieczy myjącej) możliwe są do określenia po przebadaniu partii filtrów o statystycznie średnim zanieczyszczeniu. Dostatecznie dobry efekt mycia uzyskuje się stosując następujący dobór cieczy myjących:

1) W celu odmycia zanieczyszczeń organicznych, zgęstniałych pozostałości olejowych, tłuszczy należy używać trójchloroetylenu (handlowa nazwa tri).

2) Zmiana rozpuszczalnika na benzen lub czterochlorek węgla wpłynie jedynie na czas mycia, przy czym zaletą tych rozpuszczalników jest ich niższa cena. Czterochlorek węgla — Tetra — ze względu na swoją dużą gęstość może być szczególnie cenny w metodzie kombinowanego (mechaniczno-chemicznego) mycia.

3) W celu odmycia zanieczyszczeń typu lakierów nitrocelulozowych, poliestrowych itp. proponuje się rozpuszczalniki estrowe, takie jak octan metylu, octan etylu, octan butylu. Jeżeli oleje nie mają dużej ilości zanieczyszczeń tego typu, rozpuszczalnik ten można pominąć, gdyż efekt odmycia tych pozostałości można uzyskać stosując np. aceton.

4) W celu odmycia innych nierozpuszczonych związków organicznych proponuje się aceton. Umożliwia on wskutek bardzo dobrej rozpuszczalności w wodzie i poprzednio użytych rozpuszczal-

nikach, wymyć wodą substancji mineralnych. Rozpuszczalnikami o podobnym działaniu są alkohole: metanol i etanol.

5) W celu wymycia substancji mineralnych należy stosować wodę lub 5% roztwór Na_2CO_3 (węgiel sodu). Efekt dobrego mycia można uzyskać myjąc kolejno filtry w każdym z tych rozpuszczalników przez około 15 min, w temperaturze około 20°C . Rozpuszczalniki są tak dobrane, że ich temperatury wrzenia różnią się co najwyżej o 30°C . Umożliwia to zwiększenie efektu mycia przez niewielkie podwyższenie temperatury mycia.

6) Bardziej ekonomicznym sposobem wydaje się być użycie mieszaniny homofazowej tych rozpuszczalników. Skład mieszaniny wynika z ich wzajemnej rozpuszczalności. Przy zastosowaniu metody kombinowanej efekt wymycia uzyskuje się wskutek wędrowki płynu myjącego przez pory filtru, a więc celowe jest użycie cieczy o jak największej gęstości. Oczywiście pod pojęciem ciecz rozumie się zarówno jeden rozpuszczalnik jak i mieszaninę rozpuszczalników. Do tego celu można zastosować chloroform (gęstość $1,4904\text{ g/cm}^3$) lub CCl_4 (gęstość $1,5940\text{ g/cm}^3$).

7) Mechaniczne przejście cieczy przez pory filtru można uzyskać przez: podwyższenie ciśnienia cieczy myjącej, wchodzącej na filtr; uderzeniowe przepuszczanie cieczy przez filtr; zawirowanie wkładu filtrującego, itp.

8) Szczególnie dobry efekt można uzyskać przepuszczając gaz obojętny pod dużym ciśnieniem przez wkład filtrujący, po myciu chemicznym lub zastosowaniu metody chemiczno-mechanicznej. Zaproponowany sposób mycia można stosować do wszystkich typów filtrów ze spieków brązu oraz do filtrów siatkowych z wyjątkiem filtrów mających wkład z tworzyw sztucznych.

Po umyciu wkładów jest celowe ich ostateczne oczyszczenie w następującym cyklu kolejnych operacji:

— przepuszczać w kierunku przeciwnym i zgodnym do kierunku filtrowania amoniak (20%) w ilości po ok. $1\text{ dm}^3/\text{cm}^2$ powierzchni wkładu filtru;

— przepuszczać jw. wodę destylowaną w ilości po ok. $2\text{ dm}^3/\text{cm}^2$ powierzchni wkładu filtru;

— przepuszczać jw. alkohol w ilości po ok. $1\text{ dm}^3/\text{cm}^2$ powierzchni wkładu filtru;

— przepuszczać jw. eter w ilości po ok. $0,8\text{ dm}^3/\text{cm}^2$ powierzchni wkładu filtru;

— przepuszczać gorące powietrze (temperatura $90\div 120^\circ\text{C}$) przez około 2 min w kierunku przeciwnym do kierunku filtrowania — natężenie przepływu powyżej $1\text{ dm}^3/(\text{min} \cdot \text{cm}^2)$ oraz przez około 1 min w kierunku zgodnym do kierunku filtrowania przy natężeniu przepływu rzędu $1\div 2\text{ dm}^3/(\text{min} \cdot \text{cm}^2)$.

Należy również przestrzegać następujących zaleceń:

1) Wkład filtracyjny powinien być umocowany w specjalnym przyrządzie wykonanym ze stali nierdzewnej (kwasoodpornej), którego gładkość powierzchni powinna wynosić $\nabla 10$ (aby występowała jak najmniejsza adhezja cząstek zanieczyszczeń) oraz umożliwiającym łatwe montowanie i przełączanie kierunku przepływu płynów oczyszczających. Przyrząd nie powinien zawierać (ew. zawierać minimalną liczbę) ruchomych części współpracujących ze sobą.

2) Przyrząd powinien mieć uniwersalne złącze szybko rozłączne (wejście-wyjście) do współpracy z układem zasilania czynnika oczyszczającego (amoniaku, wody, alkoholu, eteru i gorącego powietrza).

3) Uszczelnienia w przyrządzie i układzie oczyszczania powinny być wykonane z vitonu, teflonu lub miedzi.

4) Płyny użyte do oczyszczania powinny być filtrowane przez filtry ultradokładne (najlepiej spiekane z proszku chromu, niklu lub stali nierdzewnej) o dokładności absolutnej poniżej $0,8 \mu\text{m}$.

Powyższy cykl oczyszczania jest zalecany dla filtrów stosowanych w urządzeniach hydraulicznych i pneumatycznych o dokładności absolutnej poniżej $20 \div 30$ mikrometrów.

Podany powyżej cykl powinien być zalecany do oczyszczania filtrów zarówno po regeneracji, jak również metalowych filtrów nowowyprodukowanych, niezależnie od stosowanej technologii i produkcji, ale najlepiej po montażu wkładu. Ponadto może być stosowany z powodzeniem do oczyszczania wielu rodzajów metalowych sit filtracyjnych zarówno po regeneracji jak i „czystych” przed instalowaniem ich w układzie hydraulicznym.

Proponowany cykl oczyszczania ostatecznego, przy zachowaniu niezbędnych ostrożności podczas montażu i uruchomienia układu hydraulicznego, umożliwi w wysokim stopniu wyeliminowanie zanieczyszczeń osiadłych na wkładzie filtracyjnym, a przez to niedopuszczenie do utraty czystości „wewnętrznej” urządzenia hydraulicznego. Podobny cykl oczyszczania wewnętrznych powierzchni wszystkich możliwych elementów układu hydraulicznego wpływa wyjątkowo korzystnie na zwiększenie czasu pracy filtrów dokładnego i bardzo dokładnego oczyszczania oraz na podwyższenie wskaźników niezawodności pracującego układu hydraulicznego.

Należy jednak zawsze pamiętać również o konieczności właściwego przygotowania samej cieczy roboczej, a więc dokładnego odfiltrowania zanieczyszczeń znajdujących się nawet w cieczach wcześniej przygotowanych do napełniania układu.

Napełnianie układu przez filtr dokładnego oczyszczania, wyeliminowanie elementów mechanicznych ruchomych i współpracujących ze sobą w czasie napełniania (za filtrem), właściwe przygotowanie powierzchni wewnętrznych elementów układu oraz rozruch wstępny układu w warunkach idealnej czystości otoczenia, zapewniają uzyskanie takich wyników jakich spodziewamy się przez zastosowanie w układzie filtrów dokładnego oczyszczania.

Istnieją zalecenia dotyczące sposobów regeneracji wkładów zależne ściśle od składu chemicznego materiału filtracyjnego. Na przykład dla filtrów ze stali nierdzewnej jest zalecany cykl regeneracji zawierający następujące operacje:

- 1) zanurzyć element w gotującej się kąpieli 15% roztworu sody lub sody na okres 1 godziny; uwaga! nie przepuszczać sody przez element filtrujący, ponieważ soda odfiltrowuje się i jej cząstki zatykają pory;

- 2) zneutralizować sodę przez zanurzenie elementu filtrującego w gorącym 10% roztworze kwasu azotowego na czas nie dłuższy niż 5 minut;

- 3) zanurzyć element w zbiorniku, przez który przepływa prefiltrowana woda i płukać przez okres ok. 2 do 4 godzin; uwaga! przepływ wody powinien być umiarkowany tak, aby cząstki zanieczyszczeń zawieszane w wodzie nie zatkały porów;

- 4) wysuszyć zregenerowany element filtrujący.

7.4. Metody regeneracji z wykorzystaniem zjawiska kawitacji

Poniżej podano zestawienie dotyczące metod postępowania przy oczyszczaniu porowatych materiałów filtracyjnych, w których wykorzystano zjawisko kawitacji:

- 1) Oczyszczanie materiałów porowatych przez zanurzenie ich w cieczy myjącej i poddanie wibracjom wysokiej częstotliwości, a małej amplitudzie. Powierzchnię czołową wibratora umieszcza się blisko powierzchni oczyszczonego materiału tak, aby cząstki drgające słupa cieczy trafiały prostopadłe na filtr. Wywołana w ten sposób kawitacja powoduje wymywanie cząstek cieczy zawartej w porach.

- 2) Podobnie jak w punkcie 1 z tą różnicą, że oczyszczanie dotyczy usunięcia zanieczyszczeń stałych, usuwanych z porów razem z cieczą nasycającą filtr po zanurzeniu go w kąpieli.

- 3) Podobnie jak poprzednio z tą różnicą, że ciecz oczyszcza-

jąca (kąpiel), ma w tym przypadku właściwość impregnowania materiału porowatego (oczyszczanego).

4) Oczyszczanie przy ruchu części roboczej wibratora względem powierzchni oczyszczanej w kierunku prostopadłym (ruch roboczy wywołujący kawitację) oraz ruchu w kierunku równoległym (posuw umożliwiający ciągle oczyszczanie całej powierzchni wkładu).

5) Oczyszczania przez kawitację i wymywanie zanieczyszczeń strumieniem cieczy przepływającej przez oczyszczony filtr w kierunku na wibrator. Przepływ jest wymuszony nadciśnieniem wywołanym na powierzchni przeciwnej do tej, na którą działa kawitacja.

6) Wprowadzenie ssania na powierzchni przeciwnej do powierzchni działania kawitacji. Połączone działanie kawitacji i ssania umożliwia usunięcie zanieczyszczeń praktycznie z wszystkich porów wkładu, z wewnętrznymi włącznie.

7) Oczyszczanie polegające na współdziałaniu kawitacji ze zmiennym ciśnieniem wytwarzanym na przeciwnych powierzchniach wkładu. Zmienny strumień cieczy czyszczącej wzmacnia działanie sił wyrzucających zanieczyszczenia, co powoduje przyspieszenie procesu regeneracji oraz zwiększenie jego skuteczności.

8) Kombinacja oddziaływań z punktów 5 i 6; występujące na przemian ssanie i tłoczenie zwiększa w efekcie skuteczność regeneracji.

9) Sposób oczyszczania stosowany przy rurowych wkładach filtracyjnych. Polega on na gwałtownym wtłaczaniu cieczy oczyszczającej do wnętrza wkładu. Na powierzchnię zewnętrzną działa nieprzerwanie kawitacja.

Urządzenie do realizacji przedstawionych wyżej metod regeneracji powinno zawierać m.in. takie elementy konstrukcyjne jak:

— zespół wibratora wyposażonego w powierzchnię czołową drgającą wzdłużnie (prostopadle do powierzchni oczyszczanej) z wielką częstotliwością, a małą amplitudą;

— zbiornik cieczy myjącej umieszczony w taki sposób, aby umożliwiał utrzymanie wkładu w zatopieniu blisko powierzchni czołowej (roboczej) wibratora;

— środki do podawania cieczy myjącej pod ciśnieniem;

— aparatura wyposażona w środki do wytwarzania kolejno ciśnienia i ssania;

— aparatura wyposażona w urządzenie do przesuwania wkładu względem wibratora, co umożliwia ciągle oczyszczanie całej powierzchni; w czasie posuwu wkład podlegający oczyszczaniu jest zanurzony w cieczy myjącej, urządzenie posuwu zapewnia stałą odległość wibratora od filtru.

7.5. Urządzenie do regeneracji filtrów Cavitron Ultrasonics

7.5.1. Opis urządzenia

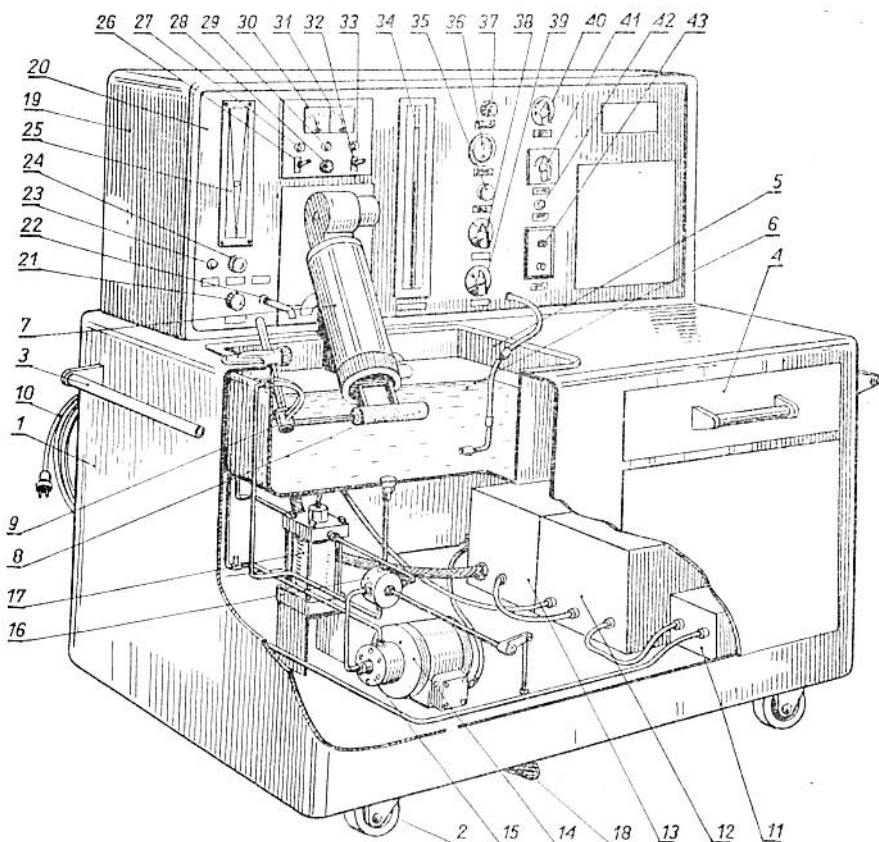
Amerykańska firma Cavitron Ultrasonics opracowała i skonstruowała oryginalne urządzenie do czyszczenia filtrów i innych elementów porowatych (patrz np. patent bryt. nr 966.858). Urządzenie to umożliwia regenerację przy użyciu metod przedstawionych w ustępie 7.4.

W urządzeniu tym pokazanym na rys. 7.1 można czyścić elementy filtrujące różnego rodzaju, jak ceramiczne, wykonane z proszków metali czy też inne elementy porowate.

Urządzenie charakteryzuje się następującymi zaletami: dobre efekty pracy, niewielkie rozmiary oraz możliwość obsługi przez niewykwalifikowanego robotnika. Ponieważ jest ono umieszczone na kółkach, więc można je szybko przemieszczać z jednego miejsca w drugie. Czas oczyszczania jednego wkładu filtrującego wynosi około 8 min.

Aparat pokazany na rys. 7.1 składa się z dwóch części: dolnej, zawierającej urządzenie zasilające i górnej, zawierającej elementy regulacyjne. Część dolna aparatu składa się z obudowy dolnej 1, kół 2, za pomocą których obsługa wykorzystując uchwyty 3 może całe urządzenie z łatwością przemieszczać po podłożu. Tylne części przedniej ściany obudowy może być ruchoma, co ułatwia dostęp przy ewentualnej naprawie czy zamianie elementów zawartych wewnątrz. Na przedniej ścianie w górnym prawym rogu znajduje się szuflada 4 przeznaczona głównie na narzędzia i elementy zapasowe. Na górnej ścianie obudowy dolnej jest widoczna wanna 5, w której znajduje się ciecz czyszcząca 6; może nią być wysoko oktanowa benzyna, nafta, rozpuszczalnik itp. Do wanny 5 i górnej ściany dolnej obudowy za pomocą śrub na specjalnej podporze jest umocowany zespół wibratora 7. Jest on umieszczony w pozycji pochylonej, górna jego część chowa się częściowo we wnęce górnej obudowy 19, natomiast dolna jego część, tzn. element roboczy jest zanurzony w kąpieli cieczy czyszczącej. Pod elementem roboczym wibratora w odległości około 0,5 mm jest umieszczona czyszcząca jednostka filtrująca 8. Jednostka ta jest utrzymywana na specjalnym ramieniu podtrzymującym 9, które umożliwia obracanie i przesuwanie filtru.

Urządzenia zawarte wewnątrz dolnej obudowy są zasilane z sieci przewodem 10. Prąd pobierany z sieci jest ustalony stabilizatorem napięcia 11 i przekazywany do zasilacza generatora 12, oraz generatora wysokich częstotliwości 13. Elementy oznaczone numerami 11, 12, 13 są częściami składowymi układu zasilania wibratora.



Rys. 7.1. Zestaw elementów i zespołów urządzenia do regeneracji filtrów

Oprócz tych urządzeń wewnątrz obudowy dolnej 1 są umieszczone niektóre elementy systemu hydrauliczno-pneumatycznego.

Na rys. 7.1 są widoczne: silnik elektryczny 14 uruchamiający pompę 15, dwupołożeniowy zawór 16 oraz urządzenie filtrujące ciecz czyszczącą 17. Dwupołożeniowy zawór 16 jest uruchamiany nożnym pedałem 18 umocowanym do dna obudowy.

Obudowa górna 19 zawiera niektóre pozostałe części układu zasilania wibratora i układu hydrauliczno-pneumatycznego. Na tablicy przyrządów 20 są umieszczone główne urządzenia regulacyjne i kontrolne.

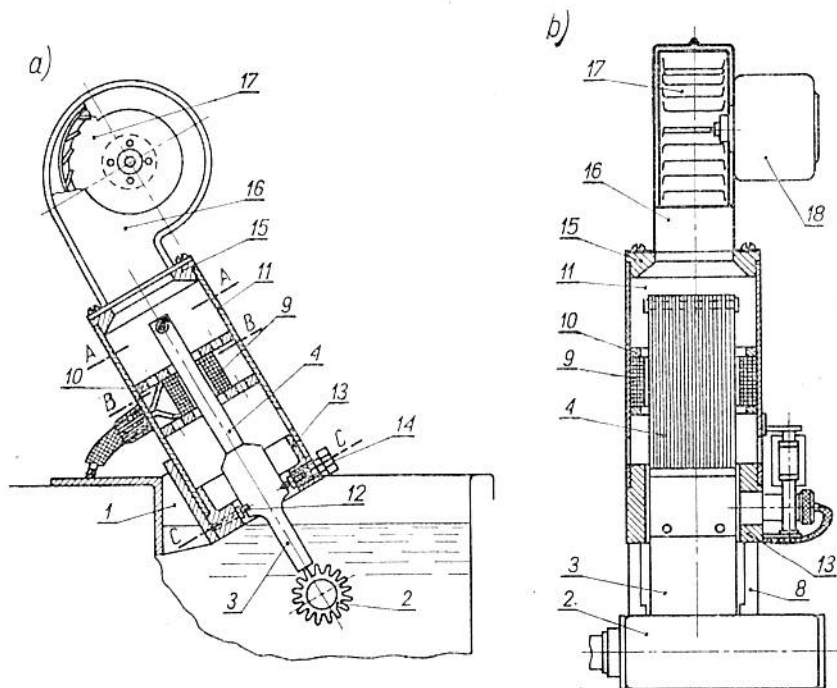
Oprócz omówionych wyżej urządzeń aparat zawiera następujące elementy i zespoły: 21 — zawór probierczy, 22 — ujście zaworu probierczego, 23 — sygnalizator wymiany filtra cieczy, 24 —

regulator przepływu cieczy, 25 — miernik przepływu cieczy (rotametr), 26 — wyłącznik wibratora, 27 — wskaźnik pracy wibratora, 28 — regulator częstotliwości, 29 — wskaźnik włączenia wibratora, 30 — wskaźnik częstotliwości, 31 — wskaźnik amplitudy, 32 — wyłącznik stabilizatora prądu, 33 — wskaźnik pracy stabilizatora prądu, 34 — miernik ciśnienia powietrza (manometr), 35 — zawór odpowietrzający, 36 — wskaźnik ciśnienia powietrza, 37 — regulator ciśnienia, 38 — dwupołożeniowy krzyżowy zawór powietrza, 39 — dwupołożeniowy boczny zawór powietrza, 40 — zawór zamykający linię powietrzną, 41 — czasomierz, 42 — wskaźnik pracy silnika pompy, 43 — wyłącznik silnika pompy.

Opis zestawu poszczególnych elementów i zespołów widocznych na rys. 7.1 zawierają poniższe punkty.

7.5.2. Zespół wibratora

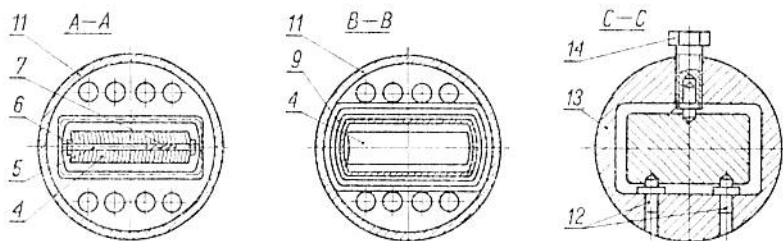
Zespół wibratora oznaczony na rys. 7.1 numerem 7 jest pokazany w przekrojach wzdłużnych na rys. 7.2 i w przekrojach poprzecznych A-A, B-B, C-C na rys. 7.3. Jest on podtrzymywany



Rys. 7.2. Przekrój wzdłużny zespołu wibratora: a) z widokiem przekroju filtru, b) z widokiem zewnętrznym filtru

wspornikiem 1 tak, że jego czołowa część robocza 3 znajduje się w bardzo małej odległości od osłony jednostki filtrującej 2.

Zespół wibratora zawiera jednostkę wibrującą, którą jest przetwornik elektromechaniczny typu elektrodynamicznego, piezoelektrycznego czy magnetostrykcyjnego. Przy częstotliwościach ope-



Rys. 7.3. Przekroje poprzeczne zespołu wibratora

racyjnych rzędu 5÷50 tys. Hz najbardziej odpowiedni jest przetwornik typu magnetostrykcyjnego.

Zawarty w zespole wibratora przetwornik magnetostrykcyjny ma rdzeń wykonany z szeregu metalowych płytek 4 co uwidoczniło w przekroju A-A i B-B na rys. 7.3. Płytki te są jednakowej grubości i najbardziej odpowiedniej wklęsłowypukłej w przekroju poprzecznym. Wykonane są z takich metali, jak permanikiel, permendur czy innych, mających wysokie własności magnetostrykcyjne. W górnym końcu płytki te są ściskane za pomocą specjalnego sprężynującego docisku. Widać to na rys. 7.3. w przekroju A-A. Docisk ten składa się z dwóch sworzni 5 zabezpieczonych od zewnątrz nakrętkami 6 i połączonych wewnątrz stosu płytek sprężyną 7. Tak wykonany docisk zapewnia stałe utrzymanie płytek we wzajemnym ścisłym przyleganiu mimo zmian temperatury, na które jest narażony stos płytek przebywając w zmiennym polu magnetycznym.

Dolny koniec rdzenia jest połączony z czołową częścią roboczą 3 na stałe za pomocą lutu srebrnego. Część robocza w przekroju poprzecznym jest zbliżona do prostokąta, który jest grubszy w miejscu połączenia z rdzeniem niż w części dolnej zanurzonej w cieczy. Boki węższe, części roboczej 3 są wodzone na dwóch przewodnicach 8. Czołowa część robocza 3 powinna być wykonana z takiego materiału, jak: stal narzędziowa, tytan, brąz fosforowy, mosiądz, stop miedziowo-berylowy itp. Długość rdzenia i części roboczej 3 powinna być równa 1/2 długości fali lub całkowitej wielokrotności częstotliwości wibrowania sekcji przetwornika. Tak utworzona sekcja przetwornika magnetostrykcyjnego wytwarza wzdłużne uderzenia części roboczej o amplitudzie rzędu 0,025÷0,076 mm. Amplituda ta jednak zależy od typu jednostki przetwor-

nika, od akustycznej charakterystyki metalu, z którego jest wykonana, od częstotliwości wibrowania oraz długości, rodzaju i kształtu części składowych. Rdzeń sekcji przetwornika otacza cewka 9 wykonana z drutu miedzianego pokrytego emalią. Korpus 10 jest wykonany z tworzywa sztucznego i opiera się na rurowej obudowie 11. Pierścienie boczne korpusu cewki mają otwory, dla umożliwienia chłodzenia powietrzem, co pokazują przekroje *A A* i *B-B* na rys. 7.3. Otaczająca rdzeń cewka 9 jest w przekroju poprzecznym zbliżona do prostokąta. Wytwarza ona zmienne pole magnetyczne, aby wywołać wzdlużne wibracje sekcji przetwornika zgodne z częstotliwością prądu zmiennego i charakterystyk akustycznych metalu, z którego jest wykonany przetwornik. Rurowa obudowa 11 może być wykonana z blachy lub tworzywa sztucznego, przy czym na jej obwodzie znajdują się otwory wylotowe powietrza.

Robocza sekcja przetwornika 3 jest utrzymywana w pozycji pracy przez trzy kołki 12 mające kołnierz zabezpieczający przed wypadnięciem. Dwa z nich są osadzone w dolnym pierścieniu 13 wykonanym z lekkiego metalu, np. stopu aluminium, natomiast trzeci jest osadzony w śrubie 14. Śruba 14, połączona gwintem z dolnym pierścieniem 13, umożliwi regulację docisku lub ewentualnie wyjmowanie przetwornika z obudowy, co pokazano w przekroju *C-C* na rys. 7.3.

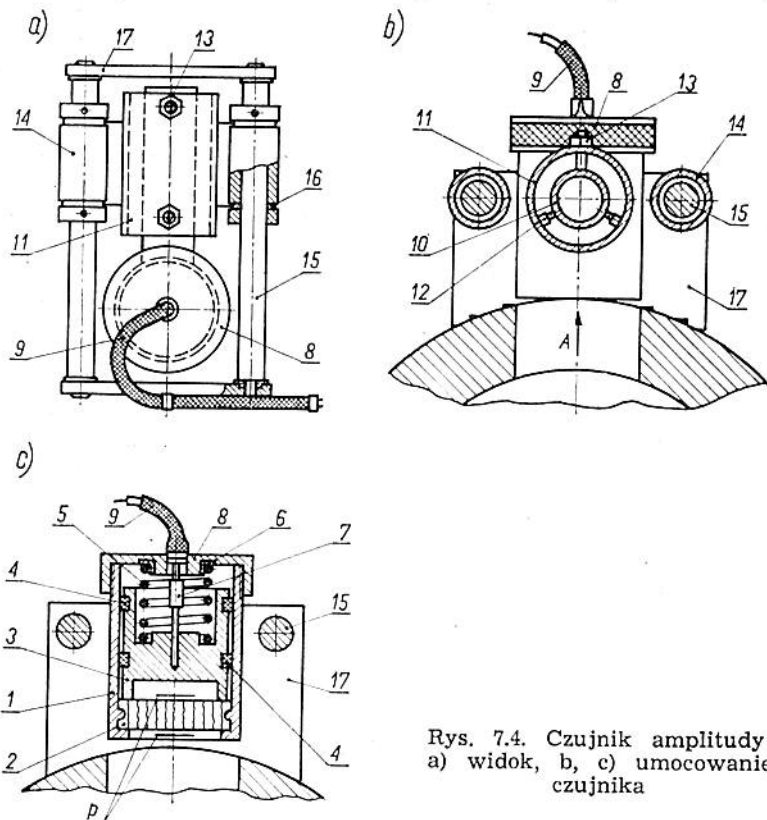
Ponieważ sekcja przetwornika znajduje się w zmiennym polu magnetycznym ulega więc nagrzaniu. Aby zabezpieczyć ją przed przegrzaniem należy zastosować wentylator 17 poruszany silnikiem 18 o mocy ułamka KM. Wentylator jest obudowany i połączony śrubami do pierścienia górnego 15 rurowej obudowy. Obudowa może być wykonana z blachy lub tworzywa, przy czym może być jednolita względnie składać się z dwóch sekcji 16.

Tak zmontowany zespół wibratora ma jeszcze z boku umocowany regulator częstotliwości oraz ekranowany przewód zasilający cewkę. Powinien on wytwarzać wibracje o częstotliwości rzędu 5÷50 tys. Hz, które z kolei wytwarzają hiperintensywną kawitację organicznego słupa cieczy czyszczącej, przenikającą przez regenerowany filtr.

7.5.3. Czujnik amplitudy

W celu wytwarzania optymalnie intensywnej kawitacji cieczy czyszczącej, zawartej pomiędzy pracującą częścią czołową jednostki wibratora a osłoną filtra, pracująca część czołowa zespołu wibratora powinna wibrować w częstotliwości rezonansowej, a system zasilania wibratora powinien tak być wykonany, aby zapewniał uzyskanie tej częstotliwości. W celu dostarczenia prądu zmiennego

nego do cewki wibratora o optymalnej częstotliwości system zasilania wibratora jest zaopatrzone w nastawcze przyrządy znajdujące się pod kontrolą obsługi oraz w czujnik piezoelektryczny wykrywający jakiegokolwiek niewłaściwe funkcjonowanie systemu zasilania wibratora. Czujnik taki jest umocowany do obudowy wibratora na przeciw otworu A, co pokazano na rys. 7.4. Czujnik



Rys. 7.4. Czujnik amplitudy:
a) widok, b), c) umocowanie czujnika

otacza tuleję cylindryczną 1 wykonaną z materiału przewodzącego prąd, zawierającą kryształ piezoelektryczny 2. Kryształ ten jest tak ustawiony i zorientowany, że szybko reaguje na fale akustyczne z powierzchni pracującej części czołowej wibratora. Jest on okresowo odkształcony przez zmienne ciśnienie tych fal akustycznych. Ponieważ deformacje te są nadzwyczaj drobne, kwarc lub tytanian baru albo podobna substancja, z której kryształ 2 jest wykonany, reaguje na nie i wytwarza na przeciwległych powierzchniach kryształu napięcie rzędu 20 V, co jest proporcjonalne do długości okresowych odkształceń.

Przeciwnie pole powierzchni p kryształu 2 są pokryte materiałem przewodzącym prąd, np. srebrem. Jedną taką powierzchnię jest zwrócona do kanału wlotowego A i opierając się o kołnierz tulei cylindrycznej 1 zawarta z masą. Natomiast przeciwna powierzchnia opiera się o wystający kołnierz korpusu 3. Ponieważ bardzo ważnym czynnikiem jest pewne stykanie się powierzchni kryształu z kołnierzem tulei cylindrycznej, zatem jest on dodatkowo zamocowany i osadzony na kryzie cylindrycznej tulei. Korpus czujnika jest odizolowany od potencjału tulei za pomocą dwu pierścieni 4 wykonanych z dielektryka i osadzonych na obwodowo umieszczonych rowkach.

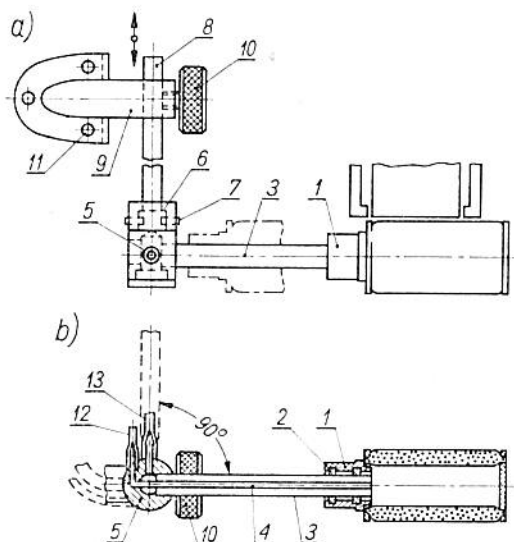
Umieszczona wewnątrz sprężyna 5 opiera się przez podkładkę izolacyjną 6 o nagwintowaną pokrywę 7 i wewnętrzną powierzchnię korpusu. Sprężyna ta zapewnia właściwy styk kołnierza korpusu z powierzchnią posrebrzaną kryształu oraz dodatkowo zabezpiecza kryształ przed wysunięciem się z kryzy. Potencjał wewnętrznej powierzchni kryształu jest przekazywany przez korpus na wtyczkę 8, która z kolei jest połączona z przewodem 9 umieszczonym na zewnątrz. Potencjał natomiast powierzchni zewnętrznej kryształu, która bezpośrednio podlega działaniu fal akustycznych, jest przekazywany przez tuleję cylindryczną 1 i połączoną z nią gwintem pokrywę 7 na ekran przewodu zewnętrznego 9. Przewód ten następnie prowadzi do tranzystorowego wzmacniacza, a stąd do woltomierza. Ponieważ obsługę interesuje amplituda wibracji czołowej części wibratora, wskaźnik amplitudy umieszczony na tablicy przyrządów (rys. 7.1) wskazuje różnicę potencjału elektrycznego na woltomierzu.

W celu odizolowania kryształu piezoelektrycznego od wpływu fal akustycznych emanujących ze wszystkich powierzchni wibratora, tulejka wraz z zawartym w niej kryształem jest umieszczona na specjalnym amortyzatorze. Amortyzator taki obejmuje rurę obejmę 10, która może być wykonana jako całość wraz z tulejką 1. Rurowa obejmę 10 jest osadzona wewnątrz cylindra 11 za pomocą dystansowych kołków 12 zakończonych na zewnątrz nakrętką 13. Rurowy cylinder 11 jest połączony na stałe z dwiema przeciwstawnymi sobie tulejkami 14 osadzonymi teleskopowo na wodzących prętach 15. Tulejki mają na swych kołnierzach pierścienie 16, których zadaniem jest tłumienie zewnętrznych wibracji oraz zapewnienie właściwego położenia tulejek na wodzących prętach, tak aby piezoelektryczny kryształ zawarty był naprzeciw wylotowego kanału A . Wodzące pręty 15 są osadzone na wspornikach 17, które łączą zespół czujnika amplitudy z obudową i z pierścieniem dolnym wibratora. Tak wykonany czujnik zapewnia obsłudze kontrolę nad amplitudą wibracji pracującej czołowej części wibratora.

7.5.4. Zespół podtrzymujący filtr

Podczas stosowania omawianego tu urządzenia do regeneracji filtrów, wkład filtru jest zanurzony w kąpeli czyszczącej i utrzymywany bardzo blisko czołowej powierzchni pracującej części wibratora na specjalnym zespole podpierającym, jaki jest pokazany na rys. 7.5. Zespół ten umożliwia usytuowanie filtru w różnych położeniach.

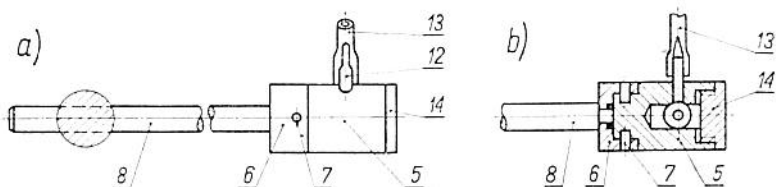
Zespół podpierający obejmuje tuleję zewnętrzną 3, której jeden koniec jest osadzony w oprawie filtru 1, drugi natomiast znajduje się w złączce 5 wykonanej w kształcie walca. Wewnątrz tulei 3 znajduje się tulejka wewnętrzna 4, której końce również są



Rys. 7.5. Zespół podtrzymujący filtr

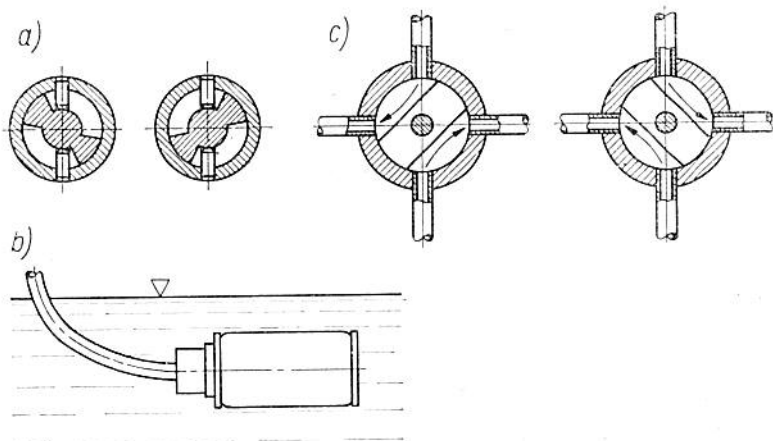
osadzone w oprawie i złączce. Utworzony przez wewnętrzną tulejkę kanał prowadzi od filtru przez bocznie umiejscowiony kanał w złączce do zewnętrznego przewodu 12. Natomiast zawarty pomiędzy tuleją zewnętrzną a wewnętrzną kanał prowadzi przez osiowo oraz średnicowo umieszczone kanały przepływowe do zewnętrznego przewodu 13. Wywiercony osiowy kanał w złączce jest zabezpieczony od zewnątrz wkrętem 14 (rys. 7.6). Walcowa złączka jest połączona przegubowo z ramieniem 8, które jest prostokątne w przekroju poprzecznym. Przegub ten obejmuje kołnierz 6 połączony na stałe z ramieniem 8 oraz wciśnięte w kołnierz dwa kołki 7. Szyjka złączki 5, osadzona wewnątrz kołnierza, ma spec-

jalne wyfrezowane kanały, dzięki którym kołki pewnie zabezpieczają złączkę przed wypadnięciem z kołnierza oraz umożliwiają ruch obrotowy jednostki filtra w granicach 90° , co pokazano na



Rys. 7.6. Złączka zespołu podtrzymującego filtr

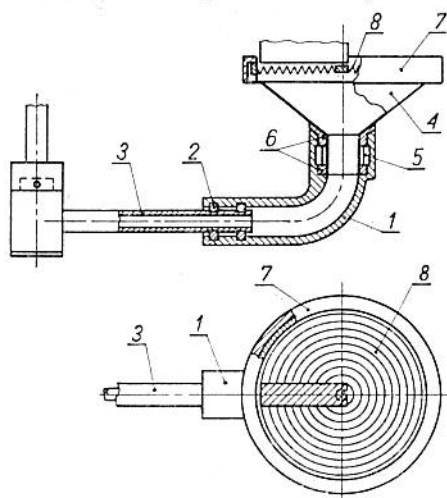
rys. 7.7. Na rysunku tym pokazano również przekrój przegubu łączącego kołnierz z szyjką złączki w dwu skrajnych położeniach. Ramię 8 jest osadzone na wsporniku 9 (rys. 7.5). Śruba 10 umożliwia ręczne przesuwanie ramienia w kierunkach oznaczonych strzałką na rys. 7.5. Wspornik natomiast jest umocowany do obudowy urządzenia lub krawędzi wanny śrubami 11. Opisany tu zespół jest stosowany do regeneracji różnego rodzaju filtrów. Elementem, który jest zmieniany przy zmianie rodzaju filtrów jest oprawa filtru. W przypadku walcowych filtrów obejmuje ona walcową oprawkę 1 wykonaną z gumy lub podobnego materiału. Oprawka ta ma kołnierz, na który jest osadzany czyszczony wkład filtru. Z zewnętrzną tuleją 3 jest ona połączona za pośrednictwem dwu uszczelnek 2 typu Zimmera. Uszczelki te umożliwiają obraca-



Rys. 7.7. Elementy urządzenia do regeneracji: a) przekrój przegubu złączki w dwóch położeniach, b) filtr zanurzony w cieczy czyszczącej, c) położenia suwaka podczas etapu czyszczenia

nie jednostki filtru wokół własnej osi oraz przesuwanie do położenia, jak pokazano na rys. 7.5a przerywaną linią.

Inny rodzaj opraw stosowanych do filtrów płaskich pokazano na rys. 7.8. Oprawa 1 jest wykonana z metalu lub tworzywa sztucznego i złączona z tuleją zewnętrzną 3 podobnie jak przy filtrach walcowych uszczelnkami sprężynującymi 2, które umożliwiają obrót i przesuwanie wzdłuż tulei 3. Na drugim wygiętym końcu oprawy 1 jest osadzony lejek 4, który może być obracany wokół własnej osi przez zastosowanie łożyska 5. W celu zabezpieczenia cieczy czyszczącej przed wyciekaniem przez to obrotowe po-



Rys. 7.8. Zespół do podtrzymywania płaskich wkładów filtracyjnych

łączenie zastosowano dwa pierścienie uszczelniające 6. Czysty płaski wkład filtru 8 jest umieszczony wewnątrz kołnierza lejka 4 i zabezpieczony przed wypadnięciem pierścieniową obejmą 7 wykonaną z gumy lub podobnego materiału.

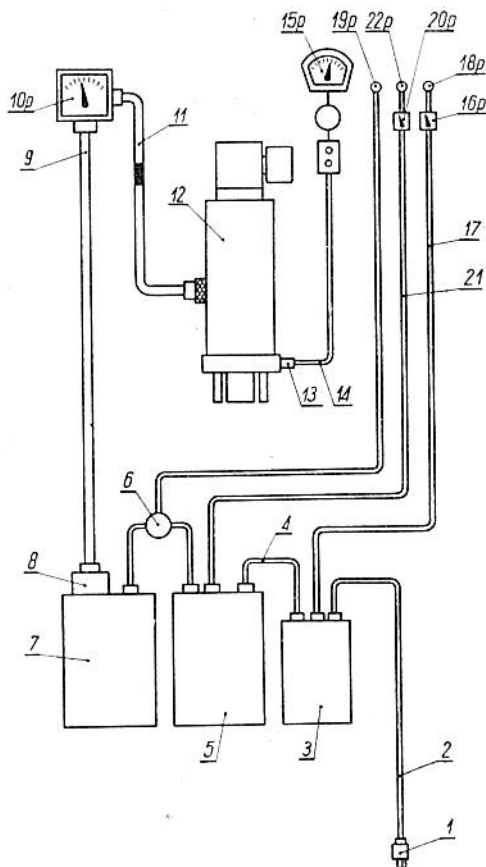
Tak wykonane oprawki wraz z zespołem podpierającym umożliwiają umieszczenie każdej części powierzchni czyszczonego filtru pod czoło pracującej części wibratora.

7.5.5. Obwód zasilania zespołu wibratora

Pokazany schematycznie na rys. 7.9 obwód zasilania wibratora jest przeznaczony do dostarczania do wibratora zmiennego prądu o odpowiednich parametrach i regulowanej częstotliwości. Jeśli pracująca część wibratora ma wibrować np. z częstotliwością 20 000 Hz, wówczas obwód zasilania wibratora powinien być na-

stawiony do pracy w tej samej optymalnej częstotliwości i do dostarczania prądu o tej częstotliwości do cewki wibratora.

Normalnie zmienny prąd o częstotliwości 50 lub 60 Hz i napięciu 220 V lub 110 V jest dostarczany z sieci wtyczką 1 i przewodem 2 do stabilizatora 3, który ustala częstotliwość na 60 Hz i napięcie na 115 V. Stąd prąd jest przekazywany przewodem 4



Rys. 7.9. Schemat zasilania zespołu wibratora, (elementy i zespoły oznaczone numerami z literą p znajdują się na tablicy przyrządów, rys. 7.1)

do zasilacza generatora 5, który z kolei łączy się przez opóźniacz 6 z generatorem wielkiej częstotliwości 7. Generator wielkiej częstotliwości jest wyposażony także w obwód dostrojenia 8, który ma połączony przewodem 9 regulator dostrojenia 10p, do którego

również prowadzi przewód 11 dostarczający prąd do cewki wibratora 12.

Ponieważ jednostka wibratora 12 jest przeznaczona do pracy w zamierzonym optimum rezonansu amplitudy i częstotliwości, każde odchylenie od tego optimum będzie odnotowane na wskaźniku 15p połączonym przewodem 14 z czujnikiem amplitudy 13. Umożliwia to obsłudze przywrócenie za pomocą regulatora 10p tych optymalnych parametrów amplitudy i częstotliwości.

Włączanie do pracy stabilizatora 3 odbywa się za pomocą wyłącznika 16p przewodem 17, co jest sygnalizowane świetlnym wskaźnikiem 18p.

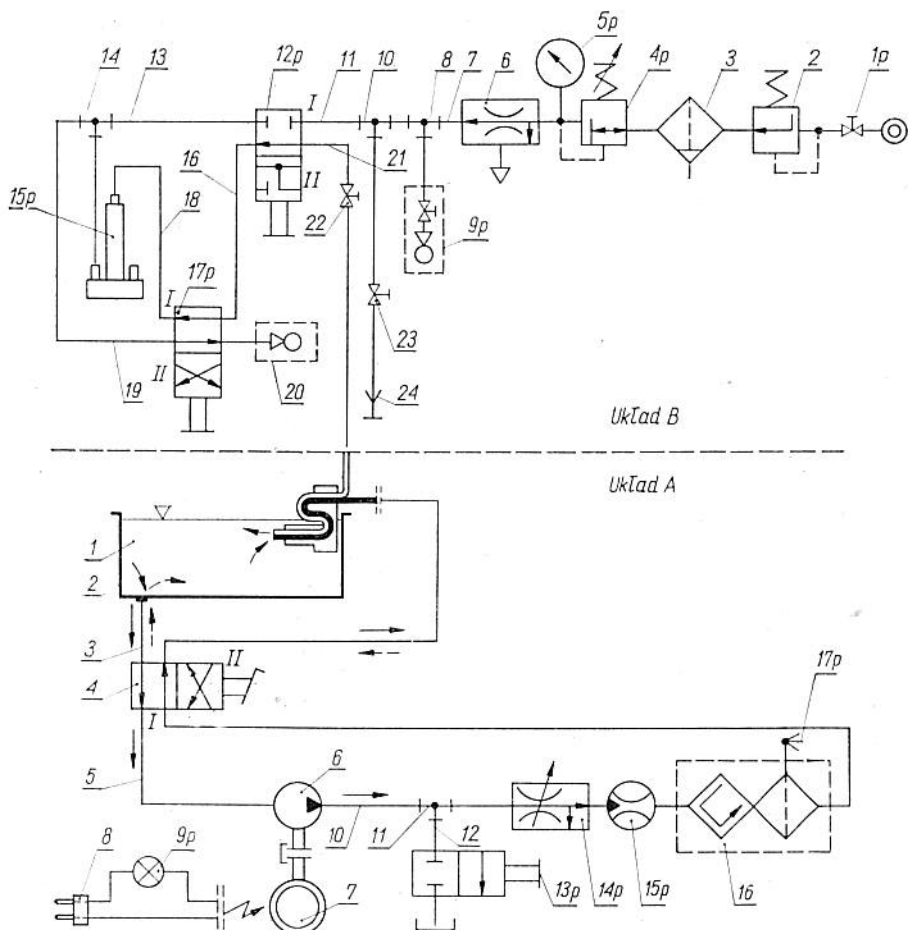
Ponieważ generator 7 ma elementy wymagające wcześniejszego nagrzania, w linii łączącej zasilacz z generatorem umieszczono opóźniacz 6, który po czasie ok. 1 minuty przepuszcza prąd do generatora; wskazuje to świetlny wskaźnik (sygnalizator) 19p. Po zapaleniu się lampki 19p można włączyć do pracy zespół wibratora. Odbywa się to za pomocą wyłącznika 20p połączonych przewodem 21, co wskazuje świetlny wskaźnik 22p.

Z powyższego opisu wynika, że aby włączyć obwód zasilania do pracy należy przekręcić pierwszy wyłącznik 16p i w tym momencie zapali się lampka 18p, a po upływie około minuty, gdy zapali się wskaźnik 19p, można włączyć wibrator przekręcając wyłącznik 20p, co pokaże wskaźnik 22p. Regulacja do odpowiedniej częstotliwości odbywa się regulatorem 10p wykorzystując jednocześnie do tego celu wskaźnik amplitudy 15p.

7.5.6. Układ hydrauliczno-pneumatyczny

Pokazany schematycznie na rys. 7.10 układ obiegu cieczy czyszczącej (układ A) jest przeznaczony do przetłaczania tej cieczy przez regenerowany filtr. Wypływ cieczy czyszczącej na zewnątrz regenerowanego filtra zachodzi wtedy, gdy zlokalizowana kolumna tej cieczy jest hiperintensywną akcją kawitacyjną wytworzoną przez pracującą część wibratora. Około 75 do 90% cząstek zanieczyszczających może być w ten sposób usuniętych z filtru i osadzonych w kąpielu cieczy. Aby usunąć pozostałości zanieczyszczeń należy zmienić kierunek przepływu cieczy, wówczas można uzyskać całkowicie czysty filtr. Sprawdzenie odbywa się przez porównanie różnicy ciśnień panujących na przeciwległych powierzchniach filtru wyczyszczonego i czystego.

Operacja czyszczenia występuje wówczas, gdy wkład filtru jest osadzony w oprawce zamontowanej na zespole podpierającym i zanurzony w kąpielu cieczy 1 znajdującej się w wannie 2. Ciecz



Rys. 7.10. Schemat układu hydrauliczno-pneumatycznego (elementy i zespoły oznaczone numerami z literą p znajdują się na tablicy przyrządów, rys. 7.1)

czyszcząca 1 jest rozpuszczalnikiem olejów i smarów oraz nie powoduje korozji wkładu filtra. Wysoko oktanowa nafta typu: rozpuszczalnik, benzyna czy tri w pełni spełniają te warunki.

Zbiornik na ciecz czyszcząca 2 jest połączony przewodem 3 z dwupołożeniowym zaworem 4 typu obrotowego. Wewnętrzny obrotowy suwak zaworu 4 jest połączony za pomocą układu dźwigni z nożnym pedałem umieszczonym na dnie obudowy dolnej aparatu. Położenie I suwaka pokazane na rys. 7.7 jest położeniem

pierwszego etapu czyszczenia, obieg cieczy w tym położeniu wskazują strzałki wykonane linią ciągłą. Położenie II jest natomiast położeniem podczas drugiego etapu czyszczenia, obieg cieczy wskazują strzałki przerywane.

Z dwupołożeniowego zaworu 4 ciecz zasysana jest przewodem 5 do odśrodkowej pompy 6, którą napędza silnik 7 zasilany z sieci prądu elektrycznego przewodem z wtyczką 8. Do przewodu zasilającego jest dołączony świetlny wskaźnik 9p sygnalizujący o pracy silnika i pompy. Zasysaną ciecz, pompa 6 tłoczy przewodem 10 przez złączkę 11 i przewód 12 do zaworu probierczego 13p. Zawór probierczy 13 służy do pobrania cieczy z obiegu i sprawdzenia ilości zawartych w niej zanieczyszczeń. Główny strumień jest tłoczony przez regulator prędkości cieczy 14p utrzymujący nastawione natężenie przepływu wskazywane przez rotometr 15p.

Wypływająca z rotometru 15p zanieczyszczona ciecz jest filtrowana w urządzeniu filtrującym 16. Urządzenie to zatrzymuje zanieczyszczenia, które nagromadziły się w cieczy czyszczącej po usunięciu ich z regenerowanego filtra. Jednocześnie urządzenie filtrujące 16 jest wyposażone w świetlny sygnalizator zanieczyszczeń 17p wskazujący kiedy należy filtr wymienić.

Oczyszczona ciecz regenerująca przewodem 18 powtórnie dostaje się do zaworu 4 skąd przewodem 19 jest przetłaczana do walcowej złączki zespołu podpierającego, a potem do wnętrza jednostki filtra.

Usuwanie cząstek zanieczyszczających warstwę filtrującą odbywa się w wyniku współdziałania hiperintensywnej kawitacji zlokalizowanej kolumny cieczy czyszczącej oraz przepływu cieczy. Dwukierunkowy przepływ cieczy umożliwia zwiększanie, jak wspomniano wcześniej, efektów regeneracji niezależnie od rodzaju czyszczonego wkładu filtrującego.

Schemat układu pneumatycznego zasilanego powietrzem (układ B) pokazano również na rys. 7.10. Układ ten jest stosowany przed, względnie po zakończeniu operacji regeneracji filtra, do określenia stopnia zanieczyszczenia lub sprawdzenia efektu czyszczenia. Można również stosować go podczas operacji czyszczenia i wówczas otrzymamy stopień zanieczyszczenia filtra w danej chwili.

Jak pokazano na rys. 7.10 dopływ sprężonego powietrza następuje przez otwarcie zaworu 1p, połączonego z zaworem bezpieczeństwa 2, który przepuszcza sprężone powietrze nie przekraczające ciśnienia 17,5 at. Pod tym ciśnieniem sprężone powietrze przepływa przez filtr 3, gdzie ulega oczyszczeniu. Oczyszczone powietrze pod ciśnieniem jest dostarczone następnie do zaworu nastawczego 4p, który zmniejsza ciśnienie do 0,5 at. Ciśnienie powietrza jest wskazywane na manometrze 5p. Aby zapewnić ciągły

dopływ powietrza pod stałym ciśnieniem, do manometru jest dołączony ogranicznik 6, kontrolujący maksymalną wielkość przepływu. Dalej powietrze o stałym ciśnieniu 0,5 at jest dostarczone przewodem 7 przez złączkę 8 do zaworu odpowietrzającego 9p, a przez następną złączkę 10 jest dostarczone przewodem 11 do dwupołożeniowego zaworu 12p. Zawór ten przekazuje sprężone powietrze z przewodu 11 do przewodu 13, a stąd przez kolejną złączkę 14 do dna manometru 15p. Dwupołożeniowy zawór 12p ma dwa pozostałe otwory połączone z przewodami 16 i 21. Przewód 16 prowadzi do następnego zaworu 17p, który jest również połączony z przewodami 18 i 19 oraz odpowietrznikiem 20. Przewód 18 prowadzi do górnego końca manometru 15p, natomiast przewód 21 przez zawór zamykający 22 prowadzi do walcowej złączki zespołu podpierającego czyszczoną jednostkę filtru. Do wspomnianej już wcześniej złączki 10 przez zamykający zawór 23 jest podłączona wtyczka odprowadzająca 24.

Chcąc sprawdzić, w jakim stopniu filtr został wyczyszczony, należy najpierw odkręcić zawór odpowietrzający 9p oraz zmienić kierunek przepływu cieczy czyszczącej tak, aby płynęła ze zbiornika poprzez warstwę filtrującą do wewnętrznej komory filtru. Następnie obracając pokrętkę zaworu 17p doprowadzamy przez odpowietrznik 20 oraz przewody 18 i 19 ciśnienie atmosferyczne do górnego i dolnego końca manometru 15p, aby w ten sposób wyzerować go (położenie I). Po wyzerowaniu manometru, pokrętki zaworów 12p i 17p powinny być w takich położeniach, aby połączone były te przewody, które na rys. 7.10 odpowiadają pozycjom I zaworów 12p i 17p. W położeniu tym dolny koniec manometru jest połączony z atmosferą. Górny natomiast za pośrednictwem przewodów 18, 16 i 21 oraz kanału w zespole podpierającym jest połączony z wewnętrzną komorą filtru. Komora ta jest ujściem dla kanału powietrznego oraz kanału cieczy czyszczącej, w związku z tym podciśnienie panujące teraz w tej komorze, wywołane siłami wciągającymi ciecz, oddziałuje na kanał powietrzny. Wartość tego podciśnienia odczytujemy na górnej skali manometru 15p. Porównując je ze standardem dla filtrów nieużywanych możemy określić stopień wyczyszczenia filtru.

Przy użyciu układu pneumatycznego można również określić czy pory warstwy filtrującej nie uległy podczas regeneracji powiększeniu. Odbywa się to przy filtrze zdjętym z oprawy zespołu podpierającego. Pokrętki zaworów 12p i 17p w pozycji II odpowiadają otwarciu zaworu odpowietrzającego 9p. W takim położeniu górny koniec manometru 15p jest połączony z atmosferą, a dolny — z główną linią przepływu powietrza, wskazując na dolnej skali manometru panujące w niej nadciśnienie.

Zdjęty układ filtru osadzamy na wtyczce odprowadzającej 24 i zanurzamy w cieczy czyszczącej. Następnie bardzo wolno zakręcamy zawór odpowietrzający 9p i wówczas następuje wzrost ciśnienia w linii powietrznej. W momencie pojawienia się pierwszych pęcherzyków powietrza na powierzchni cieczy, odczytujemy wartość ciśnienia na dolnej skali manometru 15p. Wartość tę z kolei porównujemy z wartościami uzyskanymi przy użyciu filtrów nieużywanych.

Jak widać opisany tu układ sprężonego powietrza spełnia bardzo ważne zadanie, tj. kontroluje jakość regeneracji i jest niezbędny przy tego rodzaju urządzeniach do regeneracji filtrów.

7.6. Pełne próby kontrolne wkładów filtracyjnych po regeneracji

Opisane poprzednio urządzenie oprócz wykonywania czynności regenerujących filtr, umożliwia jednocześnie stwierdzenie efektu tych czynności. Nie wymaga zatem dodatkowej aparatury do określenia, w jakim stopniu filtry zostały oczyszczone i czy nie zmieniły one wartości swych pierwotnych parametrów. Sposoby sprawdzania stopnia wyczyszczenia porów zostały opisane dokładniej w poprzednim ustępie. Tutaj zajęto się określeniem innych charakterystyk jakości filtrów po regeneracji. Należą do nich charakterystyki przepływowe i charakterystyki odfiltrowania.

Charakterystykę przepływu przez filtr po regeneracji określamy przez pomiar natężenia przepływu w funkcji spadku ciśnienia przy znanej powierzchni elementu filtrującego

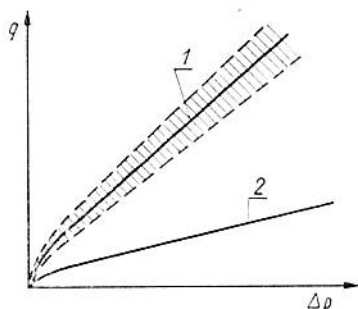
$$Q = q \cdot F = \alpha \frac{\Delta p}{\mu} \cdot F$$

gdzie: α — współczynnik proporcjonalności określający względną przepuszczalność wkładu filtru przy określonym spadku ciśnienia i lepkości płynu, μ — lepkość dynamiczna płynu, p — spadek ciśnienia, F — powierzchnia elementu filtracyjnego, Q — natężenie przepływu przez cały wkład filtracyjny, q — jednostkowe natężenie przepływu.

Pomiary $Q = f(\Delta p)$ wykonujemy w typowym układzie pomiarowym, a następnie sporządzamy wykres q i porównujemy z wykresem dla materiału filtru.

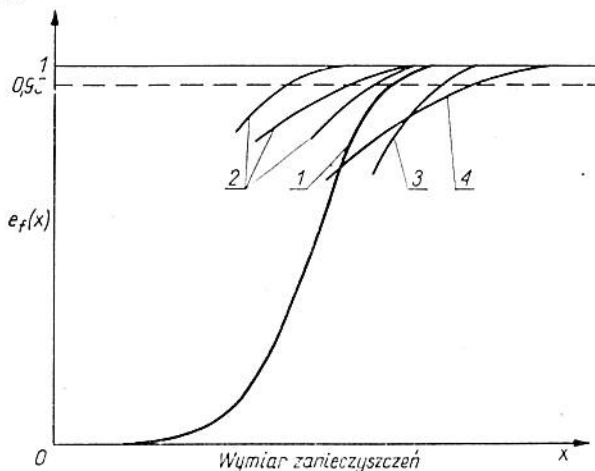
Podany układ współrzędnych (rys. 7.11) przedstawia charakterystyki przykładowe natężenia przepływu w funkcji ciśnienia. Krzywa 1 przedstawia zależność $q = f(p)$ dla materiału filtru nowego, natomiast krzywa 2 jest charakterystyką filtru mocno za-

nieczyszczonego. Charakterystyka filtru oczyszczonego powinna być zawarta w polu zakreskowanym. Jeśli otrzymana charakterystyka przebiegać będzie poniżej tego pola, filtr powinien być pod-



Rys. 7.11. Sposób oceny charakterystyki przepływowej filtru po regeneracji na podstawie jednostkowego natężenia przepływu

dany dalszej regeneracji, natomiast jeśli wykres ten przebiegać będzie powyżej, wówczas pory filtracyjne uległy nadmiernemu powiększeniu.



Rys. 7.12. Różne przypadki przebiegu charakterystyki odfiltrowania filtrów po regeneracji

Dokładność filtrowania można oceniać za pomocą różnych kryteriów. Najczęściej wykorzystuje się do tego celu charakterystykę odfiltrowania $e_f(x)$. Na rys. 7.12 przedstawiono przykładowo w podanym układzie współrzędnych różne przypadki przebiegu

charakterystyk odfiltrowania porowatych materiałów filtracyjnych po regeneracji (krzywe 2—4).

Krzywa 1 przedstawia charakterystykę filtra nieużywanego. Natomiast krzywe 2 są prawidłowym przebiegiem fragmentu początkowego charakterystyki dla zakresu $e_f(x)$ od 1 do 0,95 i nieco poniżej. W przypadku jeśli początkowa charakterystyka filtra wyczyszczonego przebiega na prawo od krzywej 1 oznacza to, że filtr uległ uszkodzeniu (krzywa 3). Wymiary porów powiększyły się i przekraczają dopuszczalny standard dla danej grupy filtrów. Krzywa 4 wskazuje na uszkodzenie filtra i niezupełne jego oczyszczenie.

LITERATURA

1. Adamson A.W.: Chemia fizyczna powierzchni. Warszawa 1963. PWN.
2. Agrikola G.: Zwölf Bücher von Berg — und Hütten wesen in Kommission VDI. Berlin 1928. Verlag GMBH.
3. Agte C., Ocetek K.: Metallfilter. Berlin 1957. Akademie-Verlag.
4. Amyx J.W., Bass D.M., Witting R.L.: Petroleum Reservoir Engineering, Physical Properties. New York 1960. McGraw-Hill.
5. Андриевский Р. А.: Порыстия металлокерамические материалы. Москва 1964. Изд. Металлургия.
6. Andrzejewski R., Gutowski W.: Fizyczne własności pyłów. Katowice 1968. Wyd. Śląsk.
7. Anduze R.A., Harris J.C.: Methods for Particle Counting in Hydraulic Fluids. Technical Documentary Report No. ML-TDR-64-72, AF Materials Laboratory, Research and Technology Division, Air Force Systems Command, Wright Peterson Air Force Base, Ohio, May 1964.
8. Appreciation du compteur de particules Coulter comme methode pratique d'evaluation du niveau de contamination des huiles hydrauliques. Bristol Aircraft Ltd; Brevet Français No. 1 080 716.
9. Backé W.: Grundlagen der Hydraulik. Inst. für hydraulische und pneumatische Antriebe und Steuerungen RWTH. Aachen 1972 (skrypt).
10. Baszta T.M.: Hydraulika w budowie maszyn. Warszawa 1966. WNT.
11. Белякин П. Н., Черненко Ж. С.: Авиационные фильтры и очистители гидравлических систем. Москва 1964. Изд. Машиностроение.
12. Богатын Д. И.: Производство металлокерамических деталей. Москва 1968. Изд. Металлургия.
13. Borowik S.: Badanie filtrów czynnika roboczego hydraulicznych urządzeń automatyki. Badanie lepkości czynnika roboczego hydraulicznych urządzeń automatyki. Cwiczenia Laboratoryjne z automatyki mechanicznej. Warszawa 1968. WPW.
14. Borowik St.: Ciecze robocze do hydraulicznych urządzeń automatyki. PAK, 1/1967.
15. Borowik S.: Filtry czynnika roboczego urządzeń automatyki mechanicznej. Warszawa 1965. Ref. Sekcji Elementów PKPiA.
16. Borowik S.: Filtry kulkowe do oczyszczania cieczy roboczych w układach hydraulicznych. Gliwice 1964. Mat. III Krajowej Konf. Autom.
17. Borowik S.: Hydromagnetyczna technika sterowania obiektów latających. Technika Lotnicza i Astronautyczna, nr 5/1968.
18. Borowik S.: Kryterium wymiarowej efektywności filtrowania do oceny charakterystyk metrologicznych porowatych materiałów filtracyjnych. PAK, 3/1967.
19. Borowik S.: Opracowanie konstrukcji wykonania i badania metalowych filtrów spiekanych do pneumatycznych układów automatyki. Warszawa 1966. Oprac. wew. KAM PW.
20. Borowik S.: Opracowanie konstrukcji, technologii i badania elementów tłumiących w pneumatycznych urządzeniach sterowania obrabiarerek. Warszawa 1967. Oprac. wew. KAM PW.

21. *Borowik S., Redmer B.*: Analitka statyki i dynamiki filtrowania plynu. Mat. Konf. na temat „Metody matematyczne w przemyśle chemicznym”. Warszawa 1969. Wyd. Inst. Chemii Ogólnej.
22. *Borowik S., Redmer B.*: Metoda analizy statystycznej efektu kolmatacji i filtrowania. Rozprawy inżynierskie, nr 2, 16 (1968).
23. *Borowik S., Redmer B.*: O pewnym modelu stochastycznym procesu filtrowania plynów. Rozprawy inżynierskie, nr 1, 18 (1970).
24. *Borowik S., Wojnar J.*: Analiza i badania własności mechanicznych filtrów dokładnego oczyszczania. Warszawa 1968. Oprac. wewn. KAM PW.
25. *Borowik S., Wojnar J.*: Opracowanie metod badawczych i wykonanie badań efektywności filtrowania oraz badania nad wpływem zanieczyszczeń w cieczy roboczej na funkcjonalność i żywotność elementów hydrauliki siłowej. Warszawa 1967. Oprac. wewn. KAM PW.
26. *Брай И. В. и др.*: Фильтры тонкой очистки дизельного топлива. Москва 1963. Изд. Машиз.
27. *Bukowski J.*: Mechanika plynów. Warszawa 1959. PWN.
28. Celloscope 302. Automatic particle counter. Introduction Manual. Prospekt f-my AB Lars Ljunberg and Co. Sweden.
29. *Chorowski B., Werszko M.*: Mechaniczne urządzenia automatyki. Warszawa 1968. WNT.
30. *Cox D.R.*: Renewal Theory. London 1967. Birbeck College University.
31. *Cranston R.W., Beymon L.R.*: A method of defining the performance of filter materials. Aircraft Engineering, Vol. 28, No. 331, 1956.
32. Critical atmosphere control. Katalog firmy W.H.S. Pathfinder Ltd. Ed. No. 2.
33. *Crombie A.C.*: Nauka średniowieczna i początki nauki nowożytnej. Warszawa 1960. Inst. Wyd. PAX.
34. *Cullen D.H.*: Filter with by-pass valve and indicator. US Pat. No. 3464556. 1969.
35. *Чапкин В. В.*: Спектральный анализ масел в транспортных двигателях. Москва 1967. Изд. Транспорт.
36. *Чертков И. Б., Рыбаков К. В., Зрелов В. Н.*: Загрязнения и методы очистки нефтяных топлив. Москва 1970. Изд. Химия.
37. *Davis H.D.*: Understanding contamination. Effects on servovalves. Hydraulics and Pneumatics, Vol. 14, No. 5.
38. *Davis M., Draycott A.*: Proc. of the II United Nat. Int. Conf. of the Peaceful Uses of Atomic Energy, Vol. 7, Reactor Technology. Geneva 1958. United Nations.
39. *Deane T.N.*: Particle Growth or the effect of Long Term Storage Upon the Contamination Level of MIL-H-5606, Agenda Item 3.7.2. SAE A-60 Committee Meeting, No. 5, October 18, 1960.
40. *Deane T.N.*: Hydraulic fluid particle growth halted. SAE Journal, Vol. 69, No. 3.
41. Determination électronique tri-dimensionnelle de la dimension de particules au-de la de la gamme des oribles, a 6000 par seconde. Coulter Counter Brevet Francais No. 10 080 716 (pros. Coultronics France S.A.).
42. Elektronisk Partikelräknare. Celloscope 302, AB Lars Ljungberg and Co., Sweden.
43. *Фигуровский Н. А.*: Очерк общей истории химии. Москва 1969. Изд. Наука.
44. *Fisher W., Jahn D.*: Eine Methode zur Ermittlung der Porengrößenverteilung. Messtechnik, Nr 12/1968.
45. *Гаврилко В. М.*: Фильтры водозаборных, водопонижительных и гидрогеологических сквази. Москва 1968. Изд. Литературы по строительству.
46. *Grochulski B., Szumielewicz K., Wanat T.*: Przegląd i naprawa sprzętu lotniczego. Warszawa 1969, WKiŁ.

47. *Guichard J.C., de Barnard A.*: Un appareil de mesure granulométrique: le Computer automatique Coulter. *Chimie Analytique*, No 3, Mars 1965.
48. *Guillon M.*: Teoria i obliczanie układów hydraulicznych. Warszawa 1967. WNT.
49. *Hall L.B.*: Ultraclean technology. *Science Journal*, April 1970.
50. *Harcourt R.A.G.*: Assessment of Cleanliness in Hydraulic Systems. The 1968 Fluid Power International Conference, London Day 2, Paper 6.
51. *Hatton R.E.*: Introduction to Hydraulic Fluids. New York 1960. Reinhold Publ. Corp.
52. *Hocut M.G.*: Establishing Hydraulic System. Operational Contamination Limits. General Electric Co.
53. *Hoffman L.J.*: Differential pressure responsive indicator. US. Pat., No. 3 429 291, 1969.
54. Informator techniczny hydrauliki siłowej. Kombinat Typowych Elementów Hydrauliki Siłowej „DELTA-HYDRAL”. Wrocław 1971.
55. *Иванский Г. Р., Митинская П. Л., Шиллатова В. Л.*: Автоматический анализ микрообъектов. Москва 1967. Изд. Энергия.
56. *Егоров И. М.*: Очистка воздуха, горючего, масла. Москва 1962. Изд. Минист. Обороны СССР.
57. *Емельянов Л. А.*: Фильтрация дизельного топлива. Москва 1962. Изд. Машгиз.
58. *Jones D.L.*: Oil filter indicating system. US. Pat., No. 3 452 696.
59. *Kączkowski Z.*: Plyty. Obliczenia statyczne. Warszawa 1968. Arkady.
60. *Keller G.B.*: Contamination and filtration. *Hydraulics and Pneumatics*. Sept., Oct., 1968.
61. *Kemula W.I., Hulanicki A.*: Spektralna analiza emisyjna. Warszawa 1956. PWN.
62. *Kolos F.*: Prerequisite Conditions for Conductimetric Determinations of Particle Distribution in Viscose Solution. Central Laboratory of the Swedish Cellulose Industry Stockholm, Sweden Svensk Papperstidning No. 64 (1961); 15.
63. *Kolos F., Treiber E.*: Particle Determinations in Viscose Solution. Central Laboratory of the Swedish Cellulose Industry, Stockholm, Sweden, Svensk Papperstidning No. 64 (1961); 16.
64. *Kotacz A.*: Wymagania czystości oraz filtrowania cieczy w układach hydraulicznych. Zeszyty pomocy OKH, nr 3 (15), 1967.
65. *Kudlaty W.J.*: Hydraulically balanced by-pass indicator for filter, US Pat., No. 3 374 890, 1968.
66. *Kudlaty W.J.*: Pressure differential indicator, US. Pat., No. 3 411 477, 1968.
67. *Lewis E.E., Stern H.*: Design of Hydraulic Control Systems. New York 1962. Mc Graw-Hill Book Co.
68. *Leśkiewicz H.J.*: Wykłady z elementów automatyki. Opracowanie wewnętrzne. Warszawa 1961—1970. IAP PW.
69. *Linson Instrument*, Laboratory Report, No. 202003B/I.G.150665; No. 202001/I.G.150365; No. 202017/I.G.010169; No. 202005/I.G.150365; No. 202004/I.G.150365; No. 202012/I.G.010965.
70. *Maligłowski B., Potelski M.*: Wyroby z drutu. Katowice 1970. Wyd. Śląsk.
71. *Marshall Piccone*. Control of Contamination in Rocket Booster Hydraulic Systems. Denver Div., Martin Co.
72. *Meredith D.B.*: Dual filters increase aircraft reliability. *Hydraulics and Pneumatics*. Febr., 1964.
73. Металлические сетки (проспект). Москва. Разноимпорт.
74. *Мяздриков О. А.*: Электрические способы объемной гранулометрии. Москва 1968. Энергия.

75. *Morgan V.*: Filter Elements by Powder Metallurgy. Symp. of Powder Metallurgy, 1954.
76. *Мошков А. Д.*: Пористые антифрикционные материалы. Москва 1963. Изд. Машиностроение.
77. *Mowshen H.C.*: Differential fluid pressure indicator US. Pat., No. 3 364 897, 1968.
78. Napęd i sterowanie hydrostatyczne. Elementy i układy. Prace Naukowe Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej nr 14. Seria: Studia i Materiały, nr 11. Wrocław 1971.
79. *Никитин Г. А.*: Влияние тонкости фильтрации жидкости на облитерацию заворов в целовых уплотнениях гидроагрегатов. Гидропривод и гидропневмоавтоматика. Т. 2. Киев 1966. Изд. Техника.
80. *Никитин Г. А.*: Вопросы фильтрации рабочих жидкостей гидросистем. Гидравлические машины и гидропровод. Т. 1. Киев 1965. Техника.
81. *Olszak W.*: Teoria plastyczności. Warszawa 1965. PWN.
82. Open-Cell Flexible PVC Foam. No. IS 713, ICI Plastics. Division-Technical Service and Development Department.
83. *Pall D.B.*: Magnetic pressure indicator. US. Pat., No. 3077854, 1963.
84. *Pall D.B.*: Pressure-responsive devices having controlled response to flow surges. US. Pat., No. 3495566, 1970.
85. Pall (U.K.) Sales Ltd. Eliminate oil and solid contaminations with Pall filters. Bull. PF65, 1966.
86. *Popoulis A.*: Probability, Random Variables and Stochastic. New York 1965. McGraw-Hill Book Co.
87. *Павловская И. И., Шибраев Б. Ф.*: Металлокерамические фильтры. Москва 1967. Изд. Недра.
88. *Перельман Р. Г.*: Проектирование и эксплуатация жидкометаллических систем. Москва 1968. Атомиздат.
89. *Писаренко Г. С. и др.*: Прочность металлокерамических материалов и сплавов при нормальных и высоких температурах. Киев 1962. Изд. АН Окр. ССР.
90. Порошковая металлургия в новой технике. Москва 1968. Изд. Наука.
91. *Prosnak W.J.*: Mechanika płynów. Warszawa 1970. PWN.
92. Purolator Products Inc., Stapelbarer Filterkorper. Patentschrift 1051249, 1955.
93. *Пузырев С. А. и др.*: Испытание бумаги и картона. Москва 1966. Изд. Легкая Промышленность.
94. *Рабинович Ф. М.*: Кондуктометрический метод дисперсионного анализа. Ленинград 1970. Изд. Химия.
95. Råd och anvisningar vid räkning och kornstorleksbestämning med Celloscope 302. Prospekt f-му АВ Lars Ljungberg and Co., Sweden.
96. *Раковский В. С.*: Металлокерамические материалы в технике. Москва 1965. Изд. Металлургия.
97. *Раковский В. С., Салиньский В. В.*: Прошковая металлургия в машиностроении. Москва 1963. Изд. Машгиз.
98. Развитие исследования по теории фильтрации в СССР (1917—1967). Москва 1969. Изд. Наука.
99. *Redmer B.*: Metody krokowe modelowania równań różniczkowych cząstkowych za pomocą iteracyjnych maszyn analogowych. Praca doktorska. Instytut Cybernetyki Stosowanej PAN. Warszawa 1972.
100. *Redmer B.*: Modelowanie analogowe zagadnień stochastycznych na przykładzie procesu filtrowania. Prace Instytutu Automatyki PAN, Zeszyt 9, Warszawa 1968.

101. *Robinson N.F.*: Hydraulic Fluid Contamination Study. Society of Automotive Engineers 749D Publ. for National Aeronautic and Space Engineering and Manufacturing Meeting Los Angeles, Calif, September 1963.
102. *Rogowska A.*: Projekt analizatora zanieczyszczeń mechanicznych. Praca dyplomowa, D-155. Warszawa 1971. IAP PW.
103. *Rogowska A.*: Projekt wstępny automatycznego analizatora zanieczyszczeń mechanicznych zawartych w oleju. Opracowanie wewnętrzne III-P258. Warszawa 1970. IAP PW.
104. *Rosaen N.O.*: Fluid filter. US. Pat., No. 3468420, 1969.
105. *Rosaen N.O.*: Horizontally mounted byonet filter device. US. Pat., No. 3405804, 1968.
106. *Rosaen N.O.*: Indicating apparatus. US. Pat., No. 3422791, 1969.
107. *Rosaen N.O.*: Pressure filter. US. Pat., No. 3080058, 1963.
108. *Sawczuk A., Jeager T.*: Grenztragfähigkeits-Theorie der Platten. Berlin 1963. Springer-Verlag.
109. *Sawczuk A.*: Z zagadnień stanów granicznych..., Księga Jubileuszowa prof. W. Wierzbickiego. Warszawa 1959. PWN.
110. *Sittig M.*: Sodium. New York. Reinhold Publ. Corp.
111. *Smith R.G.*: Magnetic pressure indicator. US. Pat., No. 3448716, 1969.
112. *Смирнов А. Ц. и др.*: Проволочные сетки и ленты. Москва 1963. Металлургиздат.
113. Справочник машиностроителя под ред. Н. С. Ачеркана. Т. 2. Москва 1956. Государственное научно-техническое изд. машиностроительной литературы.
114. *Surewicz W.*: Metody badania papieru. Warszawa 1953. PWT.
115. *Swatek F.E.*: Microorganism bug aircraft fuels, too. SAE Journal, Vol. 74, No. 4.
116. *Szczygielski J.M.*: Projekt sygnalizacji stanu zanieczyszczenia filtrów hydraulicznych. Praca dyplomowa D-163. IAP PW. Warszawa 1971.
117. *Szydelski Z.*: Napęd i sterowanie hydrauliczne w ciągnikach i samojazdnych maszynach roboczych. Warszawa 1970. WNT.
118. *Tennis F.H.*: Valve controlled filter change indicator. US. Pat., No. 3474906, 1969.
119. Theorie du compteur Coulter. Coulter Counter, Brevet Français No 1080 716 (propr. Coultronics France S.A.).
120. The Deltech Air Filter-Electro-Chemical Eng. Co. Ltd. (USA).
121. The Quantiment 720 Image Analysing Computer (prospekt firmowy).
122. *Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S.*: Theory of plates and shells. New York 1959. McGraw-Hill Co.
123. *Topol G.J.*: Differential pressure indicator. US. Pat., No. 3412706, 1968.
124. *Troskoleński A.T.*: Hydromechanika. Warszawa 1962. WNT.
125. *Uehling D.E.*: AHi-Mach Turbojet Hydraulic System. ASME Publication 64-W/Lub — 16, Presented by the Lubrication Division for Presentation of the American Society of Mechanical Engineers November 29 — December 4, 1964.
126. *Ulrich O.A.*: Analyse de la dimension de particules fines et resultats obtenus avec un analyseur electrique. Instrument Society of America Conference. New York 26 Sept. 1960 Coulter Counter, Brevet Français No 1080716.
127. *Warring R.H.*: Filters and Filtration. Trade and Technical Press Ltd., Morden. Surrey. England 1969.
128. *Williams K.J.*: Contamination effects on servovalves: it is really still a problem. Hydraulics and Pneumatics. April 1967.
129. *Возная Н. Ф.*: Химия воды и микробиология. Москва 1967. Изд. Высшая Школа.

130. *Wóycicki K.*: Wodociągi. Warszawa 1954. Wydawnictwa Budownictwa i Architektury.
131. *Vogele A.G.*: IVO Jednoprzewodowe centralne instalacje smarowania olejem. Katalog 3, 1970.
132. *Zieliński A.*: Napęd i sterowanie hydrauliczne obrabiarek. Warszawa 1972. WNT.
133. *Зрелов В. Х., Пискинов В. А.*: Реактивные двигатели и топлива. Москва 1968. Изд. Машиностроение.
134. *Жужков В. А.*: Фильтрация. Теория и практика разделения суспензии. Москва 1968. Изд. Химия.
135. Мидкие металлы. Сб. стат. Москва 1963, Госатомиздат.

SKOROWIDZ RZECZOWY

- adsorpcja 350—351 (wkl.), 356
 aerozol 79
 aglomeracja 20, 21
 agregat smarujący 180, 181
 aluminium do wytwarzania filtrów
 spiekanych 142
 analiza efektywności filtrowania
 281—348
 — — — mechanicznego 281—312
 — — — porów przegrody filtracyjnej 296—
 —299
 — — — zanieczyszczeń cieczy ze zbiorni-
 ków 20
 — — — licznikiem Coultera 433
 — — — mikroskopem 433
 — — — optyczna 350—351 (wkl.), 354
 — — — sedymentacyjna 382—390
 — — — spektralna ilościowa 463
 — — — urządzeniem skanującym 433
 analizator zanieczyszczeń 101, 189, 202
 302, 390—434, 448
 — — — automatyczny 406
 — — — z czujnikiem z wyjściem dy-
 skretnym 407
 — — — całkowity 425
 — — — Celloscope 421, 422, 431, 432
 — — — Coultera 430—432
 — — — działający na zasadzie kontra-
 stu elektrycznego 406—434
 — — — Endtera 390
 — — — kolmatacyjny 448
 — — — komputerowy 399—406
 — — — półautomatyczny 390—392
 — — — Quantimet 401—404
 — — — różniczkowy 425
 — — — z czujnikiem konduktometrycz-
 nym 407, 425—430
 aparat Celloscope 356
 aspirator 50, 271, 278
 automaty spustowe 218—222
 automatyzacja urządzeń technicznych
 9
 badanie efektywności filtrów 14,
 356—374, 377—379
 — — — niskociśnieniowych 373
 badanie efektywności filtrów wyso-
 kociśnieniowych 377
 — — — wytrzymałościowe filtrów 468—
 —506
 — — — materiałów filtracyjnych 491—
 —495
 — — — układów filtracyjnych 498—500
 barwienie elektronowe obrazu 397
 błąd koincydencji 416—418
 — — — koncentracji 419
 — — — pomiaru zanieczyszczeń 416—419
 — — — temperaturowy 418, 419
 brązy na filtry porowate 135, 141
 cermetale na filtry porowate 135
 charakterystyka odfiltrowania 94,
 106, 122—132, 157, 289—296, 306—
 —313, 320, 323, 324, 343—345, 357—
 —360, 363—370, 377, 534
 — — — dla deterministycznych para-
 metrów 307
 — — — — stochastycznego przebiegu
 spadku ciśnienia 308—310
 — — — dynamiczna 310
 — — — filtrów magnetycznych 343—
 —345
 — — — — papierowych 122—132
 — — — — po regeneracji 534
 — — — — porowatych 344
 — — — — spiekanych 364—367
 — — — — sit filtracyjnych 157
 — — — — statyczna 310
 — — — — wyznaczona metodą dwóch
 charakterystyk 363—367
 — — — — — testową 377
 — — — — — przy użyciu maszyn cyfro-
 wych 320—324
 — — — — — matematycznych
 312, 313
 — — — — — przepływowa (hydrauliczna) fil-
 trów 92, 93, 124, 125, 151—153, 157,
 212, 213, 245, 363—368, 533, 534
 — — — — — spiekanych z kulek metalo-
 wych 151—153
 — — — — — odoliwiających Deltech 212,
 213

- charakterystyka przepływowa filtrów papierowych 124, 125, 128,
 — — — po regeneracji 534
 — — — Sommermayer 245
 — — materiałów filtracyjnych 92, 93
 — przepływu cieczy przez kolmatomierz 441
 — przepuszczania zanieczyszczeń przez filtr 94
 — statyczna zaworów zbiornikowych filtrów powietrza 261
 chwytak magnetyczny 239
 ciała ferromagnetyczne 339
 — magnetyczne 339
 — paramagnetyczne 339
 ciecze hydrauliczne patrz ciecze robocze
 ciecze robocze 26—37, 45—49, 79, 97
 — — antyżuźciowe 29
 — — bardzo gęste 27, 28
 — — — płynne 27, 28
 — — do jednorazowego użytku 26
 — — — pracy powtarzalnej 26
 — — ekstra płynne 27, 28
 — — elektroizolacyjne 29, 34
 — — gęste 27, 28
 — —, klasyfikacja 27—29
 — — na alkoholach i związkach roślinnych 26
 — — niepalne 27, 29
 — — organiczne i półorganiczne 26, 27
 — — palne 27, 29
 — — płynne 27, 28
 — — półgęste 27, 28
 — — półpłynne 27, 28
 — — przekładniowe 29
 — — przemysłowe 29, 34
 — — regenerowane 28
 — — silnikowe 29, 36
 — — sprężarkowe 29, 34
 — — syntetyczne 26, 29, 30, 36, 37
 — — świeże 28
 — — technologiczne 29, 34
 — — trudno palne 27
 — — turbinowe 29, 34
 — — używane 28
 — — w postaci ciekłych metali 26, 30
 — —, wymagania 45—49
 — — zawierające wodę 26, 29, 31—35
 — — z oleju mineralnego 31
 — — — ropy naftowej 26, 29—31
 — — zużyte 28
 ciśnienie graniczne filtru wysokości-
 śnieniowego 488—490
 ciśnienie próbne (badawcze) filtru 93
 — zasilania gazów roboczych 54
 cyklon 87, 166, 207—210, 350
 czas filtrowania 325—332
 — pracy cieczy roboczej 28
 cząstki zanieczyszczeń 65—73, 390—
 —392
 części składowe filtru 94
 — — maszyny analogowej 320
 czujnik amplitudy 522—524
 — analizujący optyczny 392—394
 czułość lepkościowo-temperaturowa 47
 czystość płynu roboczego 11, 13, 16, 52, 164, 284, 285, 380, 381
 — — — a niezawodność urządzeń płynowych 16
 — — —, kryteria oceny 284, 285
 — — — dopuszczalna 13
 — urządzeń płynowych „wewnętrzna” 10
 — — — „zewnątrzna” 10
 czyszczenie elementów urządzeń płynowych 12
 — mikrootworu analizatora 428, 429
 darcy 92
 deaerolizatory 50, 271—280
 — automatyczne okresowego działania 277
 — powietrzno-olejowe 276, 277
 — z przegrodą filtracyjną 276
 deflektor 240
 detektor 400
 dobór liczby cząstek określonego wymiaru proszku testowego 381
 dokładność oczyszczania filtru 93, 288, 534
 — — — absolutna 93, 283
 — — — nominalna 93, 288
 drgania układu hydraulicznego 275
 druty do sit filtracyjnych 153
 dyfuzja przez areozole 350—351 (wkl.), 356
 dyskryminator 425
 dystrybuanta hydrodynamiczna przegrody filtracyjnej porowatej 304—306, 312, 321
 dysza przysłona 17
 efekt filtrowania magnetycznego 339
 — zapowietrzania układu hydraulicznego 271

- efektywność ekonomiczna przemysłu 9
- filtrowania (skuteczność filtrowania) 93, 173, 281—324, 339, 340, 356—371, 461
- —, kryteria oceny 285—288
- — mechanicznego 281—312
- — wg metody izotopowej 461
- — wyznaczana przy użyciu maszyn matematycznych 312—324
- — — — — przegrody porowatej 356—371
- ekran 401
- elektrolit przy metodzie kontrastu elektrycznego 425, 426, 428
- elektryczne czynniki strącające 350—351 (wkl.), 351
- elementy cieczowe (hydrauliczne) 15
 - czysto mechaniczne 15
 - dyfuzyjne 247
 - elektryczne 15
 - filtracyjne szczelinowe 111, 114
 - gazowe (pneumatyczne, fluidyczne-fluidiksy) 15
 - plynomagnetyczne 17
 - plynotermochemiczne 17
 - plynowe dysypacyjne 17
 - — impedacyjne 17
 - — generacyjne 17
 - — generacyjno-dysypacyjne 17
 - — sterujące 17
 - przepływowe ochładzane 247
 - strumieniowe 17
 - układu plynowego 23
- emulsje robocze 26, 29, 35, 36, 48
- ersted 335
- filtracja naturalna 14
- filtrat (przesącz) 80
- filtrowanie (oczyszczanie) 20, 80, 281—312, 332—348, 468
 - energetyczne 281, 332
 - magnetyczne 281, 332—345
 - mechaniczne 281—312, 468
 - plynów gorących 135
 - z mieszaniem w zbiorniku 345—348
- filtry absolutne 95, 287, 288, 346, 347
 - , badanie wytrzymałościowe 468—506
 - bibułowe 287
 - bocznikowe 182
 - ciągłego działania 183
 - ceramiczne 82, 84, 85, 110
 - ciekłych metali 246—252
 - ciśnieniowe 504—506
 - dokładnego oczyszczania 183, 509
 - dopełniające 182, 184, 185
 - drenażowe przecieków pompy 186—188
 - drutowe (druciane) 86, 110
 - dwukierunkowe 262
 - elektryczne (elektrofiltry) 82, 89, 165, 166, 332, 350—351 (wkl.), 351
 - energetyczne 81, 82, 86, 165, 196, 222, 246, 332
 - filcowe 85, 86, 110
 - gazów prostych 195
 - granulkowe 287
 - grawitacyjne 82, 89, 90, 165, 332
 - HEPA 173
 - hiperdokładne 173
 - hydrauliczne (cieczowe) 81, 82, 85, 181—194, 222—239, 256, 257, 332
 - hydrodynamiczne 332
 - kierunkowe 91
 - , klasyfikacja 78—96
 - kombinowane (złożone) 189, 332
 - komorowe (zbiornikowe) 95
 - Lincha 350
 - magnetyczne 82, 87, 165, 189, 239—246, 332—334
 - — o kształcie cylindrycznym 244
 - — — — — płytowym 244
 - — Sommermayer 242—246
 - — w postaci stosu płytek 240
 - — z magnesami stałymi 89
 - magnetyczno-mechaniczne 189, 332, 333
 - — — niepełnoprzepływowe 332
 - mieszane 182
 - mikronowe 243, 333
 - niezależne 184, 187
 - niskociśnieniowe 186, 230—239, 244
 - — włączane w linię ciśnieniową 230—239
 - nominalne 95, 287, 288
 - obejściowe 182, 187
 - , obliczenia wytrzymałościowe 468—506
 - oczkowe 81—83, 85, 110
 - odpowietrzające 182, 188, 189, 216
 - odśrodkowe (centryfugi) 86, 87, 90, 193
 - odwracalne 186
 - ogólnego przeznaczenia 12
 - okresowego działania 182, 183
 - oporu tłumiącego korektora sprężenia dynamicznego 184

- filtry oporu wejściowych kaskad sterujących 184
- optymalne 12
- o wymuszonym przepływie 95
- papierowe 82, 84, 85, 110, 112, 117—134, 231
- pełnoprzepustowe (pełnoprzepływowe) 182, 185, 186
- — nieodwracalne 182
- — odwracalne 182
- płaskie (talerzowe) 235
- plynodynamiczne 82, 90, 165, 166
- płytkowe 86, 112
- pneumatyczne (gazowe) 81, 82, 85, 175, 194—216
- — Bosch Pneumatic 206
- — JAPPW 201, 203
- — konstrukcja 199—207
- — krajowe 174, 175, 202
- — Norgren 200, 206
- — Oleoflux 206
- — radzieckie 206
- — VEB Armaturenwerk 200, 201
- — Walther Präzision 206
- — Watts Regulator 200
- — z automatem spustowym 221, 222
- — — reduktorem ciśnienia Foxboro 205, 207
- — — — KFAP 204, 205
- — — — talerzowymi segmentami filtracyjnymi ze spieków metalowych 208
- — — — zaworem kierunkowym 256
- połączone równoległe 181, 182
- — szeregowo 181, 182
- — szeregowo-równoległe 181, 182
- — w sposób wielostopniowy 181, 182
- pomocnicze 184, 189
- porowate 81—83, 85, 107—163, 165, 166, 222, 240, 246, 247
- powierzchniowe 83, 237
- powietrza 164, 173—177, 197, 210—216
- — mokre 213, 214
- — odoliwiające 211—213
- — pomocnicze 215
- — w instalacjach pneumatycznych 197
- — — pomieszczeniach technologicznych 173—177
- powrotne 182, 187
- proporcjonalne 168
- przelewowe 182, 186—188
- filtry przepływowe 89, 90
- przeponowe 451, 453
- pułapki wewnętrzne 246, 247
- — z chłodzeniem cieczą 249
- — — — powietrzem 248, 249
- — — — wrzącym toluenem 249, 250
- — — — zimne 247
- — — — zwrotne 246, 247
- siatkowe 85, 86, 110, 241, 257, 287
- — z wkładem magnetycznym 241
- — z wymontowanymi zaworami przelewowymi 257
- specjalne 12, 81
- spiekane 134—153, 185, 366, 367
- —, granulki metalowe 142—146
- — — kulkowe 137, 142—144
- — — z aluminium 142
- — — — brązu 141
- — — — ze stali chromoniklowych 141
- — — — stopów żelaza 141
- — — — z miedzi 141
- — — — niklu 141
- — — — żelaza 141
- spływowe 95, 182, 187—189, 227—230, 242
- — bez obudowy wkładu filtracyjnego 227, 228
- — siatkowe niskociśnieniowe dwuprzewodowe 228, 229
- — siatkowo-magnetyczne 242
- — — z centralnym przewodem wylotu cieczy 227, 228
- — — — talerzowymi segmentami wkładu filtracyjnego 229, 230
- — — — sprzężone (zestawy filtracyjne) 95
- — ssawne 94, 182—189, 224—227
- — siatkowe 224, 226
- — typoszeregu WS1—SM 225
- — z pompą wspomagającą 187
- — z sygnalizatorem zanieczyszczenia wkładu 226
- sterylizujące 168
- , symbole graficzne 164—169
- szczelinowe (krawędziowe) 81—83, 85, 87, 110—117, 237—239
- — pierścieniowe 112, 114
- — płytkowe 238, 239
- — wstęgowe 87
- — wzdluzne 111, 114
- szeregowo 182
- — średnociśnieniowe 230—239
- tkaninowe 85, 110
- tłoczne 95, 182, 186—188
- typu Tell Tale 12, 13, 266

- filtry typu Tell Tale z trzyzpozycyjnym sygnalizatorem 266
- uderzeniowe 90, 91
- ultradokładne 173
- upustowe (obejściowe) 95, 182, 185—187
- — bocznikowe 187
- — główne 186
- — nieproporcjonalne 182, 186
- — proporcjonalne 182, 186
- wewnętrzne 184—188
- — wzmacniacza elektrohydraulicznego 184, 185
- wgłębne 83
- wibracyjne 90, 91
- wielowarstwowe gazu 196
- wlewowe 182, 184, 188, 189, 215, 222, 223
- — Eppensteiner 223
- — OKH-WSK 223
- włoskowate (kapilarne) 81—83, 85, 110
- włókninowe 85, 110
- wstępne 86, 110
- wstępne 182—184, 193
- w układzie paliwowym silnika odrzutowego 190, 191
- — — — — wysokoprężnego 191
- — — — — przygotowania cieczy 192—194
- — — — — smarowania 177—181
- — — — — zasilającym z zastosowaniem pompy pneumohydraulicznej 194
- wymienne 185
- wyposażone w zawór przelewowy (bocznikowy) 226
- wysokociśnieniowe 189, 368—370, 230—239, 263, 468, 469
- — bardzo dokładne 468
- — dokładne 468
- — Fairey 262
- — granulkowe 232
- — na duże natężenie przepływu cieczy 235, 236
- — siatkowe 232, 236
- — średniodokładne 236
- — włączane w linię ciśnieniową 230—239
- — wysokiej dokładności 469
- — z układem filtracyjnym papierowym 230, 231
- — — — — ze spieków 232
- — z zaworem przelewowym i sygnalizatorem otwarcia 263
- filtry zabezpieczające 13, 276
- zbiornikowe 182, 259, 260
- ze spieków 82, 84, 85, 108—110
- ze stali nierdzewnej 110
- zespołu sterującego dysza—przystań 184
- zewnętrzne 182, 184
- ze wskaźnikiem stanu zanieczyszczenia wkładu 167, 268
- — — — — wilgotności 168
- — — — — złączem szybkorozłączalnym z zaworami zwrotnymi otwieranymi mechanicznie 168
- z oczyszczaniem wkładu przy użyciu silnika elektrycznego 168
- — tłumikiem drgań 167
- — upustem części cieczy 165
- — urządzeniem oczyszczania wkładu 167, 168
- — — — — odpowietrzającym 167
- — — — — odwadniającym (osuszającym) 167
- — wkładem chemicznie oczyszczającym 168
- — — — — filtrującym pojedynczym 198
- — — — — magnetycznym 240
- — — — — zaworem odcinającym 254
- — — — — przelewowym spełniającym rolę zaworu kierunkowego 258
- — — — — różnicowym 168
- frakcje wymiarowe cząstek zanieczyszczeń 73
- funkcja gęstości 105, 293, 296, 304, 305, 312, 314
- intensywności uszkodzeń 105
- niezawodności urządzeń hydraulicznych 101—106
- przetwarzania energii (formy ruchu) 15, 17
- — informacji (sterowania) 15, 17
- trwałości przeciętnej 105
- względnego udziału ilości porów w przepływie płynu 289
- gaus 335
- gazocyklon 87, 88, 196
- gazy robocze 26, 27, 41, 43—45
- gęstości defektywne 293, 296, 299, 303, 305, 313, 357, 358
- gęstość geometryczna przegrody filtracyjnej 303
- hydrodynamiczna próbek filtrów spiekanych 313
- metali 42
- powietrza 43

- gęstość rozkładu natężenia przepływu przez pory 357
- — prawdopodobieństwa wielkości cząstek przed filtrowaniem 307
 - siły magnetycznej 337
 - wody 39
 - granica proporcjonalności próbki z CuSn10 493
 - zanieczyszczeń układu 63
 - granulki filtrów spiekanych metalowych 136, 142—146
 - granulometri 431—432
- hydrocyklon 87, 193
- ilość cząstek zanieczyszczeń 284, 285, 289—291, 327, 328
- — — po filtrowaniu 289—291
 - — — przed filtrowaniem 289—291
- impuls napięciowy 414—416
- indukcja magnetyczna 335
- intensywność dopływu cząstek zanieczyszczeń do przegrody filtracyjnej 302—307
- — — — — szczeliny 438
- instalacja hydrauliczna 181—194
- pneumatyczna 164, 169—181
- interpretacja graficzna charakterystyki odfiltrowania 295
- Invarol 30
- kawitacja 274
- kąt polaryzacji 352
- klasy czystości (zanieczyszczeń) płynu 50—53
- klasyfikacja filtrów płynów roboczych 78—96
- urządzeń płynowych 15—23
- koagulacja zanieczyszczeń 80
- kolmatacja 80, 434—455
- niewymiarowa 435
 - wymiarowa 435
- kolmatomierz 435, 440—449
- równoległy 436, 442—445
 - szelinowy 350—351 (wkl.), 355
 - szeregowy 442—449
 - — ze stałwartościową regulacją 444
 - zmiennego przepływu ze szczeliną prostokątną 436—440
- komora ciśnieniowa do badań wytrzymałościowych wkładów filtracyjnych 499
- osadcza 375
 - uniwersalna do badania filtrów 374
- komora zawirowań 375
- komputer 401
- komputeryzacja procesów technologicznych 10
- koncentracja cząstek zanieczyszczeń 106, 285, 304, 307, 308, 314, 346, 347, 379—382, 345
- — — ilościowa 308
 - — — objętościowa 19, 285, 304
 - — — wagowa 285
 - — — testowych 379
 - — — w cieczy filtrowanej przez filtr absolutny 346, 347
- konstrukcje czysto mechaniczne w maszynach 9
- płynowe w maszynach 9, 10
- kontrast elektryczny 406—434
- kontrola czystości cieczy 14
- wkładów filtracyjnych po regeneracji 533—535
- korektor 400, 401
- korozja części metalowych 48
- kosze magnetyczne 332
- krawędzie filtracyjne szczelinowe 111
- krzywa kolmatacji dla filtru przeponowego 453
- kryteria oceny czystości płynów roboczych 284, 295
- — efektywności filtrowania 285—288
 - — wymiarów porów 283, 284
- łepkość a pewność pracy układu 97
- azotu 44
 - cieczy roboczej 27, 28, 32—35, 38—44, 47, 49, 97
 - dwutlenku węgla 44
 - metali 42
 - mieszaniny poliglikolu i wody 40
 - olejów 32—35, 38, 40, 49
 - — w zależności od temperatury 38
 - powietrza 43, 44
 - tlenu 44
 - wody 39, 44
- liczba cząstek zanieczyszczeń 287, 294
- — — po filtrowaniu płynu 294
 - — — przed filtrowaniem płynu 294
 - faz płynów roboczych 25—27
 - kwasowa oleju 49
 - porów przegrody filtracyjnej 314, 325

licznik Celloscope 420, 422
 — Coultera 427, 428
 łączenie zespołów zestawu oczyszczania powietrza 208
 maszyna analogowa 320
 — wytrzymałościowa Schoppera 492
 maszyny drogowe i budowlane 9
 — do obróbki bezwiórowej i wiórowej 9, 10
 — komunikacyjne 10
 — matematyczne do wyznaczania efektywności filtrowania 312—324
 — rolnicze i leśne 9
 materiały filtracyjne 91—93, 107—163
 — — mikroporowate 162, 163
 — — porowate 107—163
 — — — ceramiczne 135
 — — — cermetaliczne 135
 — — — metalowe 135
 — — — papierowe 117—134
 — — — spiekane 134—153
 — — — — z brązu 149
 — — — — ze stali nierdzewnej 149
 — — — syntetyczne 158—163
 — — — szczelinowe 111—117
 — — — z tworzyw sztucznych 135
 mechanizacja urządzeń technicznych 9
 metale ciekłe jako ciecze robocze 26, 30, 37, 41, 42
 — na filtry porowate 135
 metoda atomów znaczonych 458
 — autoradiograficzna 462
 — badania filtrów cieczy z wykorzystaniem wzmacniacza hydraulicznego 455—458
 — Barusa-Bechholda 283, 284
 — bezciśnieniowa otrzymywania porowatego polichloroku winylu 159, 160
 — bezwładnościowa 350—351 (wkl.), 355
 — biegnącego promienia 397
 — ciemnego pola 393
 — ciśnieniowa usuwania cząstek zanieczyszczeń 350—351 (wkl.), 351
 — dwóch charakterystyk 360, 361, 363—367
 — DWL 350—351 (wkl.), 354
 — dźwiękowa 350—351 (wkl.), 355
 — fotoelektryczna 354
 — fotosedymentacyjna 387, 388
 — interferencyjna 394

metoda izotopowa badania filtrów cieczy 458—462
 — kolmatacyjna badania własności filtracyjnych 121, 350
 — kontrastu elektrycznego 350—351 (wkl.), 356, 406—434
 — — fazowego 393
 — mikroskopowa badania filtrów 372
 — — — zanieczyszczeń 285, 379—382
 — niskociśnieniowa otrzymywania porowatego polichloroku winylu 159, 160
 — odwróconego mikroskopu 388—390
 — określania odkształceń układów filtracyjnych 496—504
 — podstawowa badania własności filtracyjnych 120
 — pojemnościowa (impulsowa) 350—351 (wkl.), 355, 356
 — pomiaru histerezy wzmacniaczy hydraulicznych 455
 — przenikalności magnetycznej 350—351 (wkl.), 356
 — Rittera i Drake'a 284
 — rozproszonych promieni ultrafioletowych 350—351 (wkl.), 353
 — sedymentacyjna badania zanieczyszczeń 285, 382—390
 — sedymentacyjno-wagowa badania zanieczyszczeń 385, 386
 — skanowania 396—399
 — — uwzględniająca położenie ruchomej przysłony 396, 397
 — — — wymiary elementu skanującego 397, 398
 — spektralna badania mikroobiektyw 397
 — spektrochemiczna oznaczania zanieczyszczeń 463—467
 — subiektywna kontroli czystości płynów roboczych 285
 — tensometrii elektrooporowej 491
 — testowa badania własności filtracyjnych 120, 121, 377
 — ultradźwiękowa 350
 — współczynnika temperaturowego 47
 — wyznaczania charakterystyk od-filtrowania z dwu przepływów 359, 360
 metody badań filtrów 349—467
 — — papierów filtracyjnych 120—122
 — — zanieczyszczeń płynów 349—356

- metody fizykochemiczne wytwarzania proszków metali 137
 — laboratoryjne badań filtrów 371—392
 — mechaniczne wytwarzania proszków metali 137
 — regeneracji filtrów aeromechaniczne 510
 metody regeneracji filtrów chemiczne 510, 513—516
 — — — hydromechaniczne 510
 — — — mechaniczne 510
 — — — proste 509—513
 — — — termochemiczne 510, 511
 — — — z wykorzystaniem zjawiska kawitacji 516, 517
 — usuwania cząstek zanieczyszczeń 350
 — wyznaczania efektywności filtrowania na podstawie badań przegrody porowatej 356—371
 mgła 79
 miedź do wytwarzania filtrów spiekanych 141
 mieszanina poliglikonu i wody 40
 mikrofiltr 95
 mikrofotografia cząstek zanieczyszczeń 73
 — sita filtracyjnego 154, 155
 mikroobiekty w płynach roboczych 55, 56
 mikrostruktura filtrów spiekanych z kulek brązu 147
 — zglądów materiałów porowatych 147
 mikroskop 350—354, 386, 389, 394—396, 399, 400, 430
 — analizatora Quantimet 400
 — elektronowy 350—351 (wkl.), 354
 — fazowo-kontrastowy 394
 — interferencyjny 395
 — luminescencyjny 350—351 (wkl.), 352, 395
 — optyczny 350—351 (wkl.), 395
 — o świetle rozproszonym 350—351 (wkl.), 353
 — polaryzacyjny 350—351 (wkl.), 353, 394, 395
 — skanujący (wybierający, analizujący) 350—354, 388, 389, 395, 396, 399
 — ultrafioletowy 350—351 (wkl.), 353
 — z ciemnym polem 350—351 (wkl.), 352, 395
 — — kontrastem fazowym 395
 model filtrowania mechanicznego płynów uproszczony 293
 — kontrastu elektrycznego rzeczywisty 411—414
 — — — uproszczony 408—411
 — uszkodzeń zwykłych 104
 — Weibulla 104
 modelowanie analogowe do wyznaczania efektywności filtrowania 312—320
 — filtrów opisanych funkcją Maxwella 319
 — — — — Rayleigha 319
 moduł filtru 176, 177
 — sprężystości oleju 273
 — — materiału porowatego 471
 — — proszku kulistego z brązu 491, 492
 moment magnetyczny 336
 — plastyczny 489
 namagnesowanie (magnetyzacja) 335, 337
 napięcie powierzchniowe wody 39
 natężenie pola magnetycznego 335, 336
 — przepływu przez papier filtracyjny 129
 — — — przegrodę filtracyjną 308, 326, 358
 nefelometria 350—351 (wkl.), 356
 nieczułość 99
 niesprawności nowoczesnych urządzeń płynowych 11
 niezawodność działania filtru 96
 — — urządzeń płynowych 96—106
 nikiel na filtry spiekane 141
 normalizacja czystości gazów roboczych 52
 nośność graniczna płyty wysokociśnieniowego filtru talerzowego 488—490
 nowo srebro na filtry porowate 135
 obliczenie obudowy filtru ciśnieniowego 504—506
 — przemieszczeń w układzie równań kanonicznych 475—486
 — schematu dwukrotnie statycznie niewyznaczalnego metodą sił 474
 — statyczne filtru wysokociśnieniowego talerzowego 472—488
 — wytrzymałościowe filtru 468—506
 — — — wysokociśnieniowego talerzowego 472—488

- pomiary odkształceń wkładu podczas
 badań wytrzymałościowych 501
 — przy użyciu kolmatomierza 440—
 —442
 pomieszczenia technologiczne, filtry
 powietrza 173—177
 porometr 283, 313, 362, 368
 porowatość materiału filtracyjnego
 91, 92, 107, 108, 144, 471
 — — — a opór przepływu 471
 — — — — wytrzymałość na rozcią-
 ganie 471
 — — — całkowita 144
 — — — dynamiczna (przepliwowa)
 91
 — — — skuteczna (efektywna) 91
 — — — wewnętrzna 92
 — — — zewnętrzna 91
 pory przegrody filtracyjnej 91, 109,
 145, 283, 284, 296—302
 — — —, kryteria oceny wymiarów
 283, 284
 — — — o małym rozrzucie wymia-
 rów 109
 — — — otwarte 299—302
 — — — z proszku kulistego 145
 postęp techniczny w budowie urzą-
 dzeń płynowych 12
 powietrze jako czynnik roboczy 25,
 43—45
 powierzchnia wewnętrzna porów 108
 — właściwa cząstek zanieczyszczeń
 72, 80
 poziomy zanieczyszczenia płynów
 roboczych 49—54, 64, 65
 — — — — a siła kolmatacji 64, 65
 praca urządzeń płynowych a zanie-
 czyszczenia 21, 22
 — wkładów filtracyjnych 496—498
 prawdopodobieństwo natrafienia
 cząstki zanieczyszczenia na por
 określonego wymiaru 305
 — przepuszczenia cząstki zanieczysz-
 czenia przez przegrodę filtracyjną
 295
 — zatrzymania cząstki zanieczysz-
 czenia w przegrodzie filtracyjnej
 294
 prędkość filtrowania (średnia pręd-
 kość filtracji, średnia prędkość
 filtrowanego płynu) 93
 programowanie 403
 projektowanie filtru płynu roboczego
 281
 proces Markowa 311
 proces Poissona 311
 proszek testowy 381
 proszki metali 109, 137, 144
 — — o kulistych kształtach ziarn
 144
 — — — niekulistych kształtach
 ziarn 144
 próbki metalowe filtrów spiekanych
 366, 367
 próby kontrolne wkładów filtracyj-
 nych po regeneracji 533—535
 próg kontrastowości 395
 — nieczułości 99, 100
 przedział ufności 101
 przegroda filtracyjna 283, 292—307,
 324, 356—371
 przelot filtru (średnica nominalna
 przelotu) 94
 przemieszczenia w układzie równań
 kanonicznych 475—486
 przenikalność magnetyczna 339
 przepływ laminarny (uwarstwiony)
 92
 — przez kolmatomierz 437, 441
 — turbulentny (burzliwy) 92
 przepływność materiału filtracyjnego
 (współczynnik przepuszczalności,
 jednostkowe natężenie przepływu)
 92
 przepustowość minimalna filtru 92
 przewodność cieplna metali 42
 przyczepność cieczy 47
 przygotowanie płynu roboczego 164,
 169—194
 przyrząd Celloscope 429
 — do określania wskaźnika kolma-
 tacji (Silting Index) 449—454
 punkt anilinowy oleju 33, 34, 48
 Quantimet 399—406
 receptury do przygotowania suspen-
 cji w celu liczenia cząstek liczn-
 nikiem Coultera 427
 red oil 30
 regeneracja filtrów (wkładów) 95, 96,
 507—535
 — — aeromechaniczna 510
 — — chemiczna 510, 513—516
 — — hydroaerotermostochemiczna 511
 — — hydromechaniczna 510
 — — mechaniczna 510, 511
 — — termochemiczna 510
 — —, urządzenie Cavatron Ultraso-
 nics 518—533

- regeneracja filtrów z wykorzystaniem zjawiska kawitacji 516, 517
 rozkład gamma uszkodzeń w czasie 104
 — Gaussa 105
 — logarytm-normalny 105
 — Maxwella 314
 rozkład Rayleigha 313, 314
 — wymiarów cząstek zanieczyszczeń w płynie 70, 76—79, 289—296
 — — porów otwartych filtru 284, 289, 293, 299—302
 rozpuszczanie się powietrza w cieczy 271, 272
 rozrząd 23
 roztwór do oczyszczania metalowych wkładów filtracyjnych 512
 równanie procesu filtrowania 315
 rurka strumieniowa—dyfuzor 17
- sączki 117
 schemat blokowy analizatora zanieczyszczeń 401, 402, 406, 407
 — — aparatury do badań izotopowych 461
 — — kolmatomierza równoległego 443
 — — — szeregowego 443, 444
 — — mikroskopu sedimentacyjnego 388
 — — modelu analogowego równania procesu filtrowania 316
 — ideowy analizatora kolmatacyjnego 448
 — statyczny do obliczeń uproszczonych płyty pierścieniowej filtru 483
 — układu hydrauliczno-pneumatycznego 530
 — — modelowania analogowego procesu filtrowania 316
 sedimentacja 80, 350, 351, 354, 355, 442
 — cieczy w polu ciężkości 350—351 (wkl.), 354, 355
 — gazów w polu ciężkości 350—351 (wkl.), 355
 segment odkształcony wkładu filtracyjnego z zaznaczeniem punktów pomiarowych 501
 separator odpowietrzający 275
 serwomechanizm 10, 60
 serwowawór 18, 61
 siatka filtracyjna 153, 221, 275, 341
- siatka filtracyjna, usytuowanie względem magnesów 341
 silniki pływowe 23
 siła kolmatacji 64, 65
 siły wywierane przez pole magnetyczne na cząstki ośrodka stałego 335, 336
 sita filtracyjne 153—158, 259
 — — bezoczkowe 154, 158
 — — dederonowe 155, 158
 — — metalowe 153
 — — oczkowe 154, 158
 — — plecione 154—158
 — — Poroloy T 156, 158
 — — przecinane 155
 — — składane (szczelinowe) 155
 — — skręcane 155, 156
 — — specjalnej budowy 156, 158
 — — spiekane 155
 — — tkane 153, 155
 — — wiązane 155
 — — zgrzewane 155, 156
 — — Zig-Zag 156
 — — z tworzyw sztucznych 153
 — ssawne 180
 — wlewowe 222, 223
 skanowanie 396—399
 — w płaszczyźnie obrazu 396, 397
 — — — preparatu 396, 397
 — — — źródła światła 396, 397
 skład chemiczny cieczy roboczych 26, 27
 smarność cieczy 47
 smarownica smoczkowa 168
 — z regulacją ręczną ilości oleju 168
 spadek ciśnienia na przegrodzie filtracyjnej 92, 93, 307, 308, 325—331, 496
 — — — — — przyjęty do badań wytrzymałościowych 496
 — — — — — przy liniowo narastającej ilości zanieczyszczeń 327, 328
 — — — — — — stałej ilości zanieczyszczeń 328, 329
 spektralna analiza ilościowa 463
 spektrochemiczna metoda oznaczania zanieczyszczeń 463—467
 spieki porowate 108, 109, 470—472
 — — własności mechaniczne w zależności od technologii 470—472
 spienienie 273
 sposoby włączenia filtrów 164, 169—194
 sprawność urządzeń hydraulicznych 96

- stacja przygotowania powietrza 171—
 —173
 — zasilania gazem roboczym 169
 — — w filtry 164, 169—173, 188, 189
 stale nierdzewne na filtry porowate
 135, 141
 stany skupienia plynu roboczego w
 warunkach normalnych 24, 25
 stoisko do badañ filtrów 361, 372—
 —379, 459
 — — — — metodą dwóch charakte-
 rystyk 361
 — — — — — izotopową 459
 — — — — — wytrzymałości wkładów fil-
 tracyjnych 498—500
 stopień dyspersji zanieczyszczeń 79
 stopnie czystości plynu 50, 51
 stopy żelaza na filtry spiekane 141
 supercentryfuga 350—351 (wkl.), 355
 suspensja 79
 sygnalizacja deaerolizatora 278, 279
 sygnalizator stanu zanieczyszczenia
 wkładu filtracyjnego 264—271
 — — — — — barwny 267, 268
 — — — — — Marvel Eng. Co. 269
 — — — — — Pall Corp. 269
 — — — — — prosty 266, 267
 — — — — — Rosaen Filter Comp.
 269
 — — — — — trzypozycyjny 266, 267
 — — — — — wskazówkowy 268
 — — — — — za pomocą różnicy
 ciśnienia filtra 270
 — — — — — z wyjściem elektrycz-
 nym 270, 271
 symbole graficzne filtrów plynów ro-
 bocznych 164—169
 — — urządzeń pomocniczych filtrów
 164—169
 system modułowy 176
 szczeliny filtracyjne 97, 98, 111, 114
 — — idealne 97, 98
 — — mikronowe 97
 szczelność instalacji wysokociśnie-
 niowej 262—264
 szybkość filtrowania (filtracji) fik-
 cyjna 92

 ściśliwość oleju 274
 średnica cząstek zanieczyszczeń 19,
 66—72, 289, 290, 390—392
 — — — — Frechette'a 68
 — — — — Martina 67
 — — — — nominalna 66
 — — — — średnia 67—70

 średnica cząstek zanieczyszczeń śre-
 dnia arytmetyczna 68
 — — — — — harmoniczna 69
 — — — — — logarytmiczna 68
 — — — — — objętościowa 69
 — — — — — powierzchniowa 68, 69
 — — — — — statystyczna 67—69
 — — — — — wg masy 69
 — — — — — umowna 66, 67
 — — — — — zastępcza 67, 72
 — poru 283
 światło Tyndalla 353

 temperatura a pewność pracy ukła-
 du 97
 — krzepnięcia olejów 33, 34
 — otoczenia a parametry czynnika
 roboczego 18
 — pracy cieczy roboczych 27, 28
 — — — — — filtru maksymalna 96
 — topnienia metali 42
 — wrzenia wody 39
 — zamarzania wody 39
 — zapłonu olejów 33, 34
 tensor napięć 341
 trwałość odfiltrowania filtrów mag-
 netycznych 343—345
 turbidymetria 350—351 (wkl.), 354
 twardość zanieczyszczeń wg skali
 Moosa 57, 58, 74
 tworzywa filtracyjne porowate syn-
 tetyczne 135, 158—163

 udział frakcji wymiarowej cząstek
 zanieczyszczeń liczbowy 72
 — — — — — objętościowy 70
 — — — — — powierzchniowy 70
 układ filtrowania 164—280
 — — powietrza w pomieszczeniach
 technologicznych 173—177
 — — wielostopniowego 181, 182
 — — filtrująco-regulująco-smarujący
 164
 — — hydrauliczno-pneumatyczny 529—
 —533
 — — hydrauliczny typowy 59, 60
 — — z układem dozującym jedno-
 zakresowym 424
 — — — — — trzyczekresowym 424
 — — modelowania analogowego proce-
 su filtrowania 316, 318, 320
 — — monodispersyjny zanieczyszczeń
 79
 — — olejowy 181—189
 — — paliwowy 190—193
 — — pneumatyczny 194—216

- układ polidispersyjny zanieczyszczeń 80
- pomiarowy czystości cieczy metodą fotosedymentacyjną z zastosowaniem fotokolorymetru 387
- — — zestawiony z bloków (modułów) 405
- — — z wykorzystaniem wzmacniacza hydraulicznego 456
- — do badania efektywności filtrów 373, 377—379
- — — — niskociśnieniowych 373
- — — — wysokociśnieniowych 377
- — — zdejmowania charakterystyki przepływowej 368
- programowania i opracowywania danych 403
- przygotowania płynu 164, 169—194
- smarowania 164, 169—181
- spalania próbek oleju 463
- wzmacniający 424, 425
- ultramikroskop 350—351 (wkl.), 353
- urządzenia cieczowe (hydrauliczne) 15, 25
- do badania filtrów 349—467
- — oczyszczania rtęci 250, 251
- — odprowadzania cieczy filtrów pneumatycznych 217—222
- — regeneracji filtrów Cavitron Ultrasonics 518—533
- — usuwania gazów z cieczy roboczych 274—280
- — uzyskiwania osadu na przeponie filtracyjnej 376
- — wytwarzania granulek kulistych 138
- elektrohydrauliczne (hydromagnetyczne) 15
- elektropneumatyczne 15
- gazowe (aeroliczne, pneumatyczne) 25
- hydrauliczne (cieczowe) 15, 25
- —, wyznaczanie funkcji niezawodności 101—106
- oczyszczające 246
- płynowe 9—11, 15—23, 96—106
- — chemiczne 16
- — czysto mechaniczne 16
- — dysypacyjne 16
- — elektryczne 16
- — energetyczne (siłowe) 15, 17
- — generacyjne 16
- — hydrauliczne 16
- urządzenia płynowe impedacyjne 17
- —, niezawodność działania 96—106
- — o działaniu ciągłym (analogowe) 18
- — — — dyskretnym (cyfrowe) 18
- — pneumatyczne 16
- — sterujące 15—17
- — w maszynach do obróbki bezwiórowej i wiórowej 9, 10
- — — — drogowych i budowlanych 9
- — — — komunikacyjnych 10
- — — — rolniczych i leśnych 9
- — pneumatyczne 15, 52, 54
- — napędowe 54
- — sterujące 52, 54
- pomocnicze filtrów 164—169, 252
- skanujące 350—351 (wkl.), 353, 392—399
- — elektronowe 397
- — mechaniczne 397, 398
- smarowania 177—181
- sygnalizujące (alarmujące) 454, 455
- wytwarzające i analizujące obraz 400
- usuwanie gazów z cieczy roboczych 274—280
- usytuowanie filtrów w pomieszczeniach 173—177
- — — — konwencjonalne 176
- — — — wg systemu modułowego 176
- — — — z przepływem laminarnym 176
- — — — — turbulentnym 176
- — — — układach hydraulicznych 181—194
- — — — smarowania 177—181
- — wkładu filtracyjnego 370, 371
- — zaworów odcinających 253
- uszczelnienia instalacji wysokociśnieniowej 262—264
- uszkodzenia urządzeń płynowych 11, 12, 21, 23
- waga szklana do analizy sedymentacyjnej 385, 386
- warstwy nasadkowe 350
- warunki spiekania a porowatość filtru 470
- wibrator 520—522
- wirówka (centryfuga) 87, 88, 166, 193, 350—351 (wkl.), 355

- wkłady filtracyjne (przegrody porowate) 109—116, 132—134, 146—153, 233—236, 240, 241, 247, 259, 262, 263, 332, 343, 370, 371, 469, 496—504
- — cylindryczne 233, 234, 469
- — dokładnego oczyszczania 259
- — drutowe 111—113
- — firmy MP 241
- — foliowe płytkowe 115
- — magnetyczne 240, 241, 332
- — nietrwałe 343
- — o dobrej trwałości 343
- — papierowe 132—134, 263
- — — cylindryczne 132
- — — grzbietowo-pofałdowane 132
- — — gwiazdowe 132, 133
- — — składane 132, 133
- — — talerzowe 132
- — — zwijane i skręcane 132
- — — zwojowe 133
- — — szczelinowe 111—115
- — — płytkowe 112
- — — wstęgowe 111—113
- — — z pasków folii 114, 115
- — — talerzowe 236, 469
- — — trwałe 343
- — ze spieków metali 109, 146—153, 247
- — z karbowanej taśmy foliowej 115
- — z płytek foliowych 116
- wlew 222
- własności filtracyjne materiałów spiekanych 149
- termiczne cieczy roboczych 27
- włączenie filtrów 94, 164, 169—194
- woda ciężka 31, 39
- jako ciecz robocza 26, 31—35, 39, 48
- trytowa-supercieżka 31, 39
- wskaźnik ilości zanieczyszczeń 285
- kolmatacji (siltng Index) 449—454
- koncentracji zanieczyszczeń 284
- lepkości cieczy 33, 34, 47
- oceny efektywności filtrowania 286, 287
- stosunku ilości cząstek zatrzymanych do ilości cząstek przed filtrowaniem 290
- wymiaru oddzielonego efektywnie 286
- współczynnik kulistości 411
- odfiltrowania zanieczyszczeń 286—288
- współczynnik Poissona próbek z proszku brązu 491, 492
- przepuszczania zanieczyszczeń 286, 287
- rozpuszczalności powietrza w cieczy 272
- sprawności objętościowej pompy 21
- wtryskiwacz rtęci w oczyszczalnicach alkalicznych i kwasowych 252
- wybór filtru 325
- wykres rozciągania próbki z proszku kulistego 493, 494
- ugięć płyty filtru 487
- widmowego pochłaniania światła przez związki chemiczne mikroobjektów 351
- wymiary cząstek zanieczyszczeń 53, 65—73, 283, 287, 288, 291, 293
- porów filtru 91, 283, 284, 287, 289, 291, 293
- wymienniki ciepła 23
- wyposażenie stacji zasilania hydraulicznego w filtry 188, 189
- wytrzymałość mechaniczna filtru wysokociśnieniowego 471—490
- — materiałów filtracyjnych 491—506
- wzmacniacz hydrauliczny 98—101, 455—458
- wzorce spektrograficzne 464
- wzór Barusa-Bechholda 283, 359, 366, 367
- Realeigha 411
- zabezpieczenia urządzeń płynowych przed zanieczyszczeniami 12
- zanieczyszczenia oleju 49
- płynu roboczego 11, 12, 18—22, 49—79, 97—101, 283, 292—296, 379—382, 507
- — a praca serwomechanizmu 61
- — — — układu 18, 21, 22, 97
- — — — wzmacniacza hydraulicznego 98—101
- — — — trwałość i dokładność działania układu 18
- — — bardzo drobne 55
- — — bezpośrednie 55, 56, 79
- — — drobne 55
- — — duże 55
- — — koloidalne 55
- — —, koncentracja 379—382

- zanieczyszczenia płynu roboczego mechaniczne 58
 - — — metalowe 507
 - — — naturalne 74—78
 - — — nieorganiczne 507
 - — — organiczne 19, 507, 508
 - — — pierwiastkami 57
 - — — plastyczne 55
 - — — pośrednie 55, 56, 79
 - — —, przyczyny i skutki 58—65
 - — — reologiczne 507
 - — —, rodzaje 54—58
 - — — stałe 19, 58, 507
 - — — średnie 55
 - — — testowe (standardowe, sztuczne) 55, 56, 74—79, 379, 380
 - — — w czasie transportu i składowania 18, 19
 - — — — układzie hydraulicznym silnika 61—63
 - — — — — zamkniętym 20
 - — —, wymiary 283
 - — — związkami chemicznymi 57
 - powietrza jako gazu roboczego 54
 - urządzeń płynowych 12, 15—23
 - wkładu filtracyjnego 264—271
- zapowietrzenie układu hydraulicznego 271—275
- zasilanie mgłą olejową łożysk wrzecioną 179
 - urządzeń pneumatycznych 169
 - zespołu wibratora 528
- zawory 11, 217, 218, 252—264, 376
 - elektrohydrauliczne 11
 - kierunkowe 255—259
 - odcinające 253—255
 - odprowadzania cieczy półautomatyczne 218
 - — — ręczne 217
 - — — probiercze 376
 - zawory przelewowe 256—259
 - przełączające 255
 - zabezpieczające 259, 260
- zdolność zatrzymywania zanieczyszczeń przez filtr względna (względna skuteczność filtrowania) 94
- zespół czujnikowy 421, 422
 - liczący 424
 - podtrzymujący filtr 525—527
 - sprężarkowy zasilania pneumatycznego 171
- zestaw filtrująco-regulująco-smarujący 169
 - oczyszczania powietrza z cyklonem gazowym 207—211
 - przygotowania mgły olejowej 179
 - zasilania sprężarek ze smarowaniem olejowym 171
- zjawisko elektrokinetyczne w filtrach cieczy 83
 - kontrastu elektrycznego 356
 - łączenia cząstek małych (aglomeracja) 20, 21
 - Tyndalla 353
- złącza filtrów 252—264
 - — szybkozłączalne (szybkozłącza) 253, 254
- złączka zespołu podtrzymującego filtr 526
- zol 79
- związki chemiczne stanowiące zanieczyszczenia płynów roboczych 57
 - chlorowane 37
- żelazo na filtry spiekane porowate 135, 141
- źródła zanieczyszczeń cieczy roboczych 58, 59
 - zasilania urządzeń pneumatycznych 169