

## ANALIZA POMIARU OPORU WŁAŚCIWEGO OSADÓW ŚCIEKOWYCH

Jednym z podstawowych parametrów, charakteryzujących zdolności filtracyjne osadu jest opór właściwy. Stanowi on integralną część równań, opisujących proces filtracji, na bazie których dokonuje się doboru i projektowania urządzeń odwadniających. Parametr ten powinien w sposób jednoznaczny określić właściwości filtracyjne osadów. Badania wykazały, że niewielkie różnice w metodyce prowadzenia pomiaru oporu właściwego osadu prowadzą do istotnych różnic wyników. Analizę pomiaru oporu właściwego osadów ściekowych przeprowadzono w oparciu o studium literaturowe i badania własne.

### Podstawy teoretyczne procesu filtracji

Równanie różniczkowe filtracji jest wynikiem liczących prac naukowych, bazujących na prawie Poiseuille'a i D'Arcygo, którzy wykazali doświadczalnie, że objętość filtratu otrzymana w małych odstępach czasu z jednostkowej powierzchni jest wprost proporcjonalna do różnicy ciśnień i odwrotnie proporcjonalna do lepkości filtratu i ogólnego oporu osadu [1—3].

W postaci różniczkowej można to przedstawić następująco:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\Delta p}{\mu R} \quad (1)$$

Jeżeli przepływ  $\left(\frac{dq}{dt}\right)$  jest stały w warstwie osadu i medium filtracyjnym można wykazać, że całkowity opór  $R$  jest sumą oporu warstwy osadu  $R_c$  i przegrody filtracyjnej  $R_m$ :

$$R = R_c + R_m \quad (2)$$

Opór warstwy osadu zmienia się ze wzrostem jej wysokości.

Uwzględnienie wzrostu oporu właściwego osadu od wysokości warstwy zastępuje się zależnością zmian oporu od wzrostu suchej masy osadu, przypadającej na jednostkę powierzchni filtracji:

$$R_c = r w \quad (3)$$

$$W = C q \quad (4)$$

Opór właściwy  $r$  jest oporem osadu o jednostkowej suchej masie przypadającej na jednostkę powierzchni filtracyjnej:

$$C = \left( \frac{K_o Q_t}{1 - \frac{K_o}{K_e}} \right) 100 \quad (5)$$

Parametr  $C$  często zastępuje się wielkością  $C_1$ :

$$C_1 = \frac{K_o Q_t}{100 K_o} \quad (6)$$

Podstawiając do równania (1) zależności (2), (3) i (4) otrzymuje się:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\Delta p}{\mu(r c q + R_m)} \quad (7)$$

Całkując równanie (7) otrzymujemy liniową zależność:

$$\frac{t}{q} = \frac{\mu r C}{2 \Delta p} q + \frac{\mu R_m}{\Delta p} \quad (8)$$

Jeżeli  $q$  jest objętością filtratu otrzymaną z jednostkowej powierzchni:

$$q = \frac{V}{A}$$

równanie (8) przyjmuje postać:

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu r c}{2 \Delta p A^2} \cdot V + \frac{\mu R_m}{\Delta p} = bV + k \quad (10)$$

Wyrażenie  $\frac{\mu r c}{2 \Delta p A^2}$  jest współczynnikiem kierun-

kowym prostej w układzie  $(V, \frac{t}{V})$  i służy do określania oporu właściwego osadu przy użyciu lejka Büchnera [4].

Teoria filtracji, opisująca dynamikę rozdziału faz została opracowana dla osadów nieściśliwych, dla osadów ściekowych nie jest zatem adekwatna. Proces filtracji osadów ściekowych nie przebiega bowiem w całym zakresie badań

zgodnie z modelem matematycznym opisanym równaniem (10).

W rzeczywistości zależność  $\frac{t}{v} = (v)$  przedstawiona graficznie wykazuje odchylenia od prostej na początku i pod koniec procesu, co zasadniczo rzutuje na wyznaczoną wartość oporu właściwego. W procesie filtracji osadów ściekowych przy stałej różnicy ciśnień można wyróżnić trzy etapy:

- etap wstępny, w którym opór przepływu filtratu jest najmniejszy i praktycznie równy oporowi przegrody filtracyjnej,
- etap filtracji właściwej, dla którego słuszne jest równanie Carmana,
- etap końcowy, w którym następuje zmiana struktury osadu i gwałtowny wzrost oporu właściwego.

Większość sposobów wyznaczania oporu właściwego, opisanych w literaturze, proponuje odzucenie filtratu, uzyskanego we wstępnym etapie filtracji. Zingler [5—6], Hermanowicz [7], Lewandowski [8, 9], Swanwick [10], Komorek [11], podając metodę pomiaru oporu właściwego osadu, proponują pominięcie objętości filtratu otrzymanego w pierwszych dwóch minutach eksperymentu. Natomiast Żużikow [12] i Turowski [13] proponują pominięcie objętości filtratu, uzyskanego w czasie pierwszej minuty, a Heide i Kampe [14] proponują pominięcie „pierwszych partii filtratu”, bez ściślejszego sformułowania. Bryszewski [15] proponuje określenie oporu właściwego po upływie etapu wstępnego, stwierdzając jednocześnie, że dokładne wyznaczenie jego końca jest bardzo trudne i zależy od kryterium, przyjętego przez prowadzącego pomiar. Notebaert [16] proponuje rozpoczęcie pomiaru w chwili, gdy pierwsza kropla filtratu spada na dno cylindra miarowego, a więc nie pomija objętości początkowej. Chcąc wyjaśnić przyczyny niezgodności lub dużego rozrzutu wartości wyników pomiaru z równaniem (10) należy przeanalizować wszystkie parametry równania. Przy zachowaniu stałej różnicy ciśnień, powierzchni filtracji jak również lepkości filtratu zmienia się parametr C, gdyż sucha masa osadu, przypadająca na jednostkę objętości filtratu maleje.

Określając pozorny opór właściwy osadu, poprzez zastąpienie parametru C wielkością  $C_1$ , stałą dla danego osadu, zależną od stężenia suchej masy w nadawie, za jedyny parametr, mogący powodować zmianę współczynnika kierunkowego w równaniu (10) uważać należy opór właściwy osadu. Określając pozorny opór właściwy należy pamiętać, że jest on związany z oporem rzeczywistym poprzez równanie:

$$r = r^x \frac{100 - K_o}{100 \left( 1 - \frac{K_o}{K_e} \right)} \quad (11)$$

Decydujący wpływ na otrzymaną wartość oporu właściwego ma czas prowadzenia doświadczenia. W literaturze spotykamy różne sugestie określania końca pomiaru.

Coackley [4] proponuje prowadzenie procesu do momentu pęknięcia placka, tzn. do spadku ciśnienia w układzie doświadczalnym. W przypadku osadów komunalnych czas ten jest bardzo długi i wynosić może nawet kilkanaście godzin. Zingler proponuje zakończenie pomiaru w momencie przzerwania struktury placka, czyli wtedy, gdy wszystkie ciała stałe utworzyły plackę, w pełni jeszcze nasyceny wodą. Stan ten łatwo uchwycić w układzie współrzędnych ( $\log v$ ,  $\log t$ ), ponieważ w chwili przzerwania struktury placka, punkty pomiarowe odchylają się od prostej.

W metodzie opracowanej przez Heidego [14] zakończenie pomiaru następuje po uzyskaniu 75 cm<sup>3</sup> filtratu z 125 cm<sup>3</sup> próbki osadu.

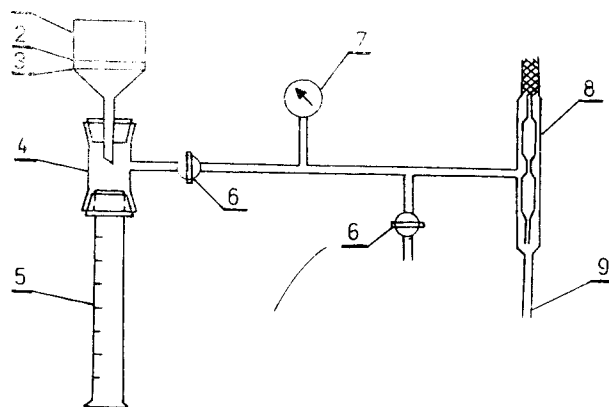
Turowski proponuje prowadzenie pomiaru w okresie do 20 min.

Notebaert jako koniec pomiaru uznaje moment, w którym punkty wykresu  $\frac{t}{v} = (v)$  odchylają się od prostej.

## Przebieg badań

Badania własne prowadzono na osadach nadmiernych, przefermentowanych i pokoagulacyjnych, bez ich wstępnego przygotowania lub kondycjonowanych, pochodzących z kilku górnośląskich oczyszczalni ścieków. Osady do badań homogenizowano.

W artykule przedstawiono tylko najbardziej reprezentatywne wyniki badań. Opór właściwy osadów mierzono przy użyciu aparatu konstrukcji Coackleya [4] (rys. 1).



Rys. 1 Urządzenie do pomiaru oporu właściwego: 1 — lejek Büchnera, 2 — bibuła filtracyjna, 3 — siatka z metalu lub tworzywa, 4 — głowica próżniowa, 5 — cylinder miarowy, 6 — kurek jednodrożny, 7 — manometr, 8 — smoczek wodny, 9 — króciec do podłączenia pompy próżniowej

Lejek Büchnera, o średnicy 9 cm połączono za pomocą głowicy z cylindrem miarowym o objętości 100 cm<sup>3</sup>. Głowica zaopatrzona jest w króciec do przyłączenia pompy próżniowej. Wyjściowa objętość próbki osadu wynosi 100 cm<sup>3</sup>. Pomiar prowadzi się przy różnicy ciśnień 0,5 · 10<sup>5</sup> N/m<sup>2</sup>. Jako przegrodę filtracyjną stosowano bibułę filtracyjną Whatman 1. Pomiar czasu rozpoczynano w momencie, gdy pierwsza krop-

| Rodzaj osadu                                                                                 | Stężenie suchej masy osadu,<br>% | Pomijany czas filtracji<br>s        | Pomijana objętość filtratu,<br>cm <sup>3</sup> | Opór właściwy<br>m/kg · 10 <sup>12</sup> | Czas pomiaru,<br>s |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------|
| Osad nadmierny z oczyszczalni w Wiśle — Jawornik, koagulowany Utrwalaczem IS (4,2 % sm.)     | 4,28                             | 0,0<br>5,0<br>15,0<br>60,0<br>120,0 | 0,0<br>10,0<br>28,0<br>55,0<br>74,0            | 0,95<br>1,39<br>2,97<br>7,92<br>83,2     | 300                |
| Osad pokoagulacyjny z doświadczalnej stacji odnowy wody w Zabrze                             | 1,9                              | 0,0<br>60,0<br>120,0                | 0,0<br>35,0<br>50,0                            | 5,35<br>6,18<br>10,07                    | 480                |
| Osad nadmierny z oczyszczalni w Strzemieszycach                                              | 4,92                             | 0,0<br>60,0<br>120,0                | 0,0<br>24,5<br>35,0                            | 7,13<br>11,7<br>15,9                     | 1080               |
| Osad przefermentowany z oczyszczalni w Pyskowicach, koagulowany Utrwalaczem IS (10% sm.)     | 4,75                             | 0,0<br>30,0<br>120,0                | 0,0<br>10,0<br>25,0                            | 11,17<br>12,36<br>12,9                   | 1170               |
| Osad przefermentowany z oczyszczalni w Pyskowicach, kogulowany FeCl <sub>3</sub> (7,9% sm.)  | 4,75                             | 0,0<br>60,0<br>120,0                | 0,0<br>9,0<br>14,0                             | 32,6<br>53,8<br>62,56                    | 9600               |
| Osad przefermentowany z oczyszczalni w Pyskowicach, kogulowany FeCl <sub>3</sub> (5,26% sm.) | 4,75                             | 0,0<br>60,0<br>120,0                | 0,0<br>10,0<br>15,0                            | 74<br>80,3<br>108,2                      | 13200              |

Tabela 2

## ZESTAWIENIE OPORU WŁAŚCIWEGO OSADÓW DLA II I III FAZY FILTRACJI

| Rodzaj osadu                                                                                 | Stężenie suchej masy osadu,<br>% | Czas trwania pomiaru,<br>s | Opór właściwy osadu dla II fazy filtracji<br>m/kg · 10 <sup>12</sup> | Czas trwania II fazy filtracji,<br>s | Stężenie suchej masy osadu pod koniec II fazy filtracji,<br>% | Opór właściwy osadu dla III fazy filtracji,<br>m/kg · 10 <sup>12</sup> | Stężenie suchej masy osadu pod koniec III fazy<br>% |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Osad nadmierny z oczyszczalni w Wiśle-Jawornik, koagulowany Utrwalaczem IS (4,2% sm.)        | 4,28                             | 300                        | 0,95                                                                 | 120                                  | 16,4                                                          | 18,12                                                                  | 36                                                  |
| Osad pokoagulacyjny z doświadczalnej stacji w Zabrze                                         | 1,9                              | 480                        | 5,35                                                                 | 300                                  | 11                                                            | 27,0                                                                   | 31,6                                                |
| Osad nadmierny z oczyszczalni w Strzemieszycach                                              | 4,92                             | 1080                       | 7,13                                                                 | 360                                  | 10,0                                                          | 53,2                                                                   | 14,4                                                |
| Osad przefermentowany z oczyszczalni w Pyskowicach, koagulowany Utrwalaczem IS (10% sm.)     | 4,75                             | 1170                       | 11,17                                                                | 600                                  | 9,6                                                           | 73,1                                                                   | 14,3                                                |
| Osad przefermentowany z oczyszczalni w Pyskowicach, kogulowany FeCl <sub>3</sub> (7,9% sm.)  | 4,75                             | 9600                       | 32,6                                                                 | 1200                                 | 9,0                                                           | 187                                                                    | 17,5                                                |
| Osad przefermentowany z oczyszczalni w Pyskowicach, kogulowany FeCl <sub>3</sub> (5,26% sm.) | 4,75                             | 13200                      | 74,0                                                                 | 3600                                 | 8,05                                                          | 299,4                                                                  | 15                                                  |

la filtratu spadała na dno cylindra i kończono w momencie spadku ciśnienia.

Wyniki badań przedstawiono w tablicach 1, 2 oraz na rysunkach 2, 3.

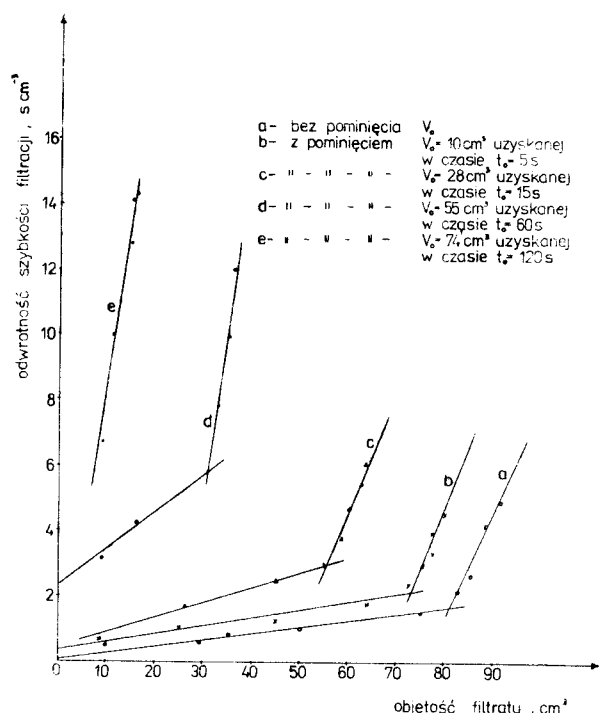
Na początku procesu filtracji rozrzut punktów może być znaczny, co spowodowane jest tworzeniem się warstwy osadu na przegrodzie filtracyjnej. Ponieważ wyznaczona wartość oporu właściwego zależy głównie od tangensa nachylenia prostej, interpolowano ją spośród punktów, wyraźnie tworzących linię prostą.

Omówienie i podsumowanie wyników badań

Analizując graficzny przebieg funkcji  $t_v = f(v)$

(rys. 2, 3) można zauważyć, że ma ona kształt zbliżony do paraboli, którą można zastąpić w

przybliżeniu dwiema liniami prostymi, określając w ten sposób drugi i trzeci etap filtracji. Współczynnik kierunkowy drugiej prostej jest kilkakrotnie większy od współczynnika kierunkowego pierwszej, co świadczy o gwałtownym wzroście oporu właściwego osadu. W drugiej fazie procesu następuje, przez narastającą warstwę osadu — stosunkowo szybka filtracja wody wolnej zwanej również grawitacyjną lub międzycząsteczkową [17]. W fazie trzeciej mamy do czynienia ze znacznie trudniejszym **wygniataniem wody kapilarnej**. Dominująca część fazy stałej osadu występuje w postaci kłaczków we wnętrzu których znajdują się liczne mikropory wypełnione prawie nieruchomą cieczą zwaną kapilarną. Pod wpływem ciśnienia, po wytworzeniu się placka osadowego i odfiltrowaniu wody wolnej, następuje w procesie filtracji załamanie struktury osadu i wygniatanie



Rys. 2 Wykres zależności objętości filtratu  $V$  od stosunku  $t/V$  dla osadu nadmiernego z oczyszczalni w Wiśle-Jaworniku

wody kapilarnej. W wyniku tego następuje wyraźne zmniejszenie porowatości, a zatem silny przyrost oporu właściwego osadu. Procesy fizyczne zachodzące w tej fazie filtracji są bardzo złożone.

Bolek [18—19] proponuje je do procesów konsolidacji w mechanice gruntów i proponuje nazywanie tego etapu konsolidacją osadu. Z krzywych, przedstawionych na rys. 2 i 3 wynika, że ze wzrostem pomijanej objętości filtratu rośnie kąt nachylenia prostej w układzie  $t/V=f(V)$  dla drugiego i trzeciego etapu filtracji.

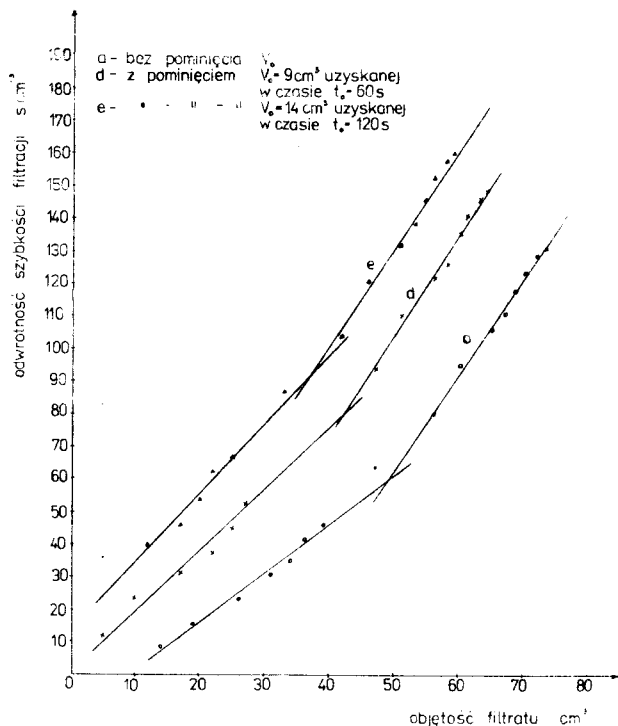
Wykresy na rys. 2 dotyczą osadu łatwiej odwadniającego się, na rys. 3 trudno odwadniającego się.

Z badań własnych wynika (tabela 1), że najmniejszą wartość oporu właściwego uzyskuje się w przypadku, gdy początkowa objętość filtratu nie jest pomijana.

Przez przyjęcie różnych wartości  $V_0$  jako  $f(t)$  rośnie otrzymana wartość oporu właściwego osadu. Różnice otrzymanych wartości są znaczne i często przekraczają 100%. Największe rozbieżności występują dla osadów łatwo odwadniających się. Z wartości w tabeli 2 wynika wyraźnie, że znaczny wzrost oporu właściwego osadu występuje przy przejściu drugiej fazy w trzecią. Największe wzrosty obserwujemy dla osadów łatwo odwadniających.

Czas trwania drugiej fazy filtracji jak również uzyskiwane stężenia suchej masy osadu w tej fazie są różne i zależą od charakteru badanego osadu.

Ustalenie w metodach pomiaru czasu trwania pierwszej fazy filtracji lub objętości otrzymanego w tym okresie filtratu niezależnie od właściwości fizyko-chemicznych badanych osadów, prowadzi do dużych rozbieżności otrzymywa-



Rys. 3 Wykres zależności objętości filtratu  $V$  od stosunku  $t/V$  dla osadu przefermentowanego z oczyszczalni w Pyskowicach

nych wyników, jak również powoduje trudności w jednoznacznym określeniu właściwości filtracyjnych osadu.

Przejście procesu filtracji do fazy konsolidacji drugiej fazy (w trzecią) zależy również od właściwości badanego osadu.

Mierząc więc opór właściwy osadów ściśliwych nie można zakładać z góry czasu trwania pomiaru lub uzależniać go od otrzymanej objętości filtratu. Przerywanie pomiaru w dowolnym momencie procesu, nie związanym z krzywą filtracji i interpolowanie prostej w układzie  $(V, \frac{t}{V})$  dla wszystkich punktów pomiaru,

proceedzi do poważnych błędów i dużej rozbieżności, otrzymywanych wartości oporu właściwego. Zakończenie pomiaru w momencie gdy punkty pomiarowe odchylają się od prostej w

układzie  $(\log V, \log t)$  lub  $(V, \frac{t}{V})$ , pozwala na

wyznaczenie oporu właściwego osadu w drugim etapie filtracji; nie jest jednak znane zachowanie się osadu w fazie konsolidacji.

Przedstawione tu badania wykazały, że zmiany i pewna dowolność w sposobie interpretacji danych doświadczalnych powodują istotne różnice w wyznaczanej wartości oporu właściwego. Z tego powodu, ujednolicenie metodyki pomiaru oporu właściwego osadów ściekowych jest konieczne.

#### Oznaczenia:

- b — tangens nachylenia prostej w układzie  $(V, \frac{t}{V})$   $\text{s.m}^{-6}$
- p — całkowita różnica ciśnień  $\text{N.m}^{-2}$
- q — objętość filtratu otrzymana z jednostkowej powierzchni filtracji  $\text{m}^3.\text{m}^{-2}$

|                                                                         |                    |
|-------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| $r$ — opór właściwy osadu                                               | $\text{m.kg}^{-1}$ |
| $r^*$ — pozorny opór właściwy                                           | $\text{m.kg}^{-1}$ |
| $t$ — czas filtracji                                                    | s                  |
| $t_o$ — pomijany czas filtracji                                         | s                  |
| $w$ — sucha masa osadu, przypadająca na jednostkę powierzchni filtracji | $\text{kg.m}^{-2}$ |
| $A$ — powierzchnia filtracji                                            | $\text{m}^2$       |
| $C$ — sucha masa osadu przypadająca na jednostkę objętości filtratu     | $\text{kg.m}^{-3}$ |
| $C_1$ — sucha masa osadu przypadająca na jednostkę objętości osadu      | $\text{kg.m}^{-3}$ |
| $K_e$ — stężenie suchej masy w osadzie odwodnionym                      | %                  |
| $K_o$ — stężenie suchej masy w nadawie                                  | %                  |
| $R$ — opór całkowity                                                    | $\text{m}^{-1}$    |
| $R_c$ — opór osadu                                                      | $\text{m}^{-1}$    |
| $R_m$ — opór przegrody filtracyjnej                                     | $\text{m}^{-1}$    |
| $V$ — objętość filtratu                                                 | $\text{m}^3$       |
| $V_o$ — pomijana objętość filtratu                                      | $\text{m}^3$       |
| $Q$ — gęstość filtratu                                                  | $\text{kg.m}^{-3}$ |
| $\mu$ — lepkość filtratu                                                | cP                 |

## LITERATURA

1. R. S. GALE: Filtration theory with special reference to sewage sludges. Wat. Pollut. Control. 1967, 66, s. 622.
2. R. S. GALE: Research in Filtration of Sewage Sludges. Filtration and Separation, July-August 1971, s. 431.
3. P. C. CARMAN: Study of the mechanism of filtration. J. Soc. Chem. Ind. 1934 nr 22, 1934 nr 38.
4. P. COACKLEY, B. R. JONES: Vacuum Sludge Filtration. Sewage and Industrial Wastes 28 1956, s. 963.
5. E. ZINGLER: Die Filtration von Abwasserschlämmen — Grundlagen und Modellversuche, Veröff. Institut für Stadtbauwesen. TU Braunschweig H. 2. 1969.
6. E. ZINGLER, W. NIEMITZ, R. LESCHBER, O. BUSSE: Bestimmung des spezifischen Filterdwierstandes von Klärschlamm. Korrespondenz Abwasser, 1970 nr 10.
7. W. HERMANOWICZ i inni: Fizykochemiczne badania wody i ścieków. Wyd. Arkady, Warszawa 1976.
8. Z. LEWANDOWSKI: Obliczanie oporu właściwego filtracji osadów. Gaz, Woda i Technika Sanitarna. Tom. XLIX 1975, s. 191.
9. Z. LEWANDOWSKI: Urządzenie do pomiaru oporu właściwego filtracji osadu. Gaz, Woda i Technika Sanitarna. Tom XLIX, 1975 s. 300.
10. J. D. SWANWICK: The measurement of specific filtration and its application in studies of sludge dewatering. J. Inst. Sew. Purit. 1961 July-August, s. 386.
11. J. KOMOREK: O pomiarze oporu właściwego filtracji i CSK, podstawowych parametrów w technologii odwadniania osadów ściekowych. Biuletyn informacji technicznej. Biprowod, z. 16/1971, s. 37.
12. W. A. ŻUŻIKOW: Filtracja. Wydawnictwo Chemii Moskwa 1971. Wyd. Stroj. i zdat. C. T.
13. U. S. TUROWSKI: Obrabotka osadkow stocznych wod. Moskwa 1975.
14. B. A. HEIDE, G. R. KAMPE: MFT-Methode als kenmerk voor de ontwaterbaarheid van slib. Instituut voor Milieuhygiene en Gezondheidstechniek. TND publikatie nr 651.
15. Cz. BRYSEWSKI: Wpływ okresu rozbiegowego na dynamikę filtracji placzkowej, próżniowej. Praca doktorska 1976, Politechnika Wrocławska.
16. F. E. NOTEBAERT, D. A. WILM, A. A. HAUTE: A new deduction with a large application of the specific resistance to filtration of sludges. Water Research. Vol. 9. 1975, s. 667.
17. E. KEMPA: Procesy całkowitego unieszkodliwiania osadów ściekowych. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, nr 2, Tom XLII, s. 52.
18. M. BOLEK: Zeitverlauf der Entwässerung in der Filterpresse. Berg-Wiss. 11, 1974, nr 19—20, s. 440.
19. M. BOLEK, J. LOCHMAN: Untersuchungen zur zeitlichen Änderung des Filterkuchenwiderstandes. Verfahrenstechnik 8. 1974 nr 6, s. 246.