

Robert I. Mackie, Wojciech Dąbrowski, Michał Zielina

## Modelowanie stacji filtrów pospiesznych o skokowo zmiennej wydajności

Filtracja jest jednym z podstawowych procesów uzdatniania wody, mającym duży wpływ na jej jakość oraz koszty eksploatacyjne i inwestycyjne stacji wodociągowej. Szczególnie ważne jest więc prawidłowe projektowanie filtrów pospiesznych, a także zastosowanie odpowiedniego systemu ich regulacji i eksploatacji.

### Systemy regulacji filtrów pospiesznych

Filtry pospieszne mogą być regulowane mechanicznie, przy pomocy napędu pneumatycznego lub hydraulicznego, a także niemechanicznie. Do niemechanicznych metod ograniczania przepływu wody można zaliczyć między innymi samoczynne urządzenia, takie jak przelewy, kryzy i lewary. W tradycyjnie stosowanych systemach z mechaniczną regulacją przepływu określoną wydajność filtru uzyskuje się za pomocą automatycznie regulowanych przepustnic umieszczonych na dopływie lub odpływie wody z filtru. W ostatnich latach obserwuje się wzrost zainteresowania systemami z niemechaniczną regulacją. W systemach tych automatycznie regulowane przepustnice zastąpione są odpowiednio zaprojektowanym dopływem, a w układach o skokowo zmiennej wydajności – także kryzami umieszczonymi na odpływie.

Jednym z systemów niemechanicznej regulacji filtrów pospiesznych jest system o skokowo zmiennej wydajności – VDRF (*Variable Declining Rate Filters*), szczególnie korzystny ekonomicznie, stosowany głównie w stacjach wodociągowych o dużej wydajności, przy co najmniej czterech filtrach. W systemie tym doprowadzenie wody surowej położone jest poniżej najniższego zwierciadła wody nad złożem filtracyjnym. Na odprowadzeniu filtratu założona jest kryza lub zwężka wytwarzająca opory przepływu w warunkach ruchu turbulentnego. Kryza ta przeciwdziała nadmiernemu przeciążeniu hydraulicznemu filtrów.

W systemie VDRF filtry ostatnio płukane pracują przy dużych obciążeniach hydraulicznych, co pozwala na uzyskanie większej wydajności, niż w systemie o stałym przepływie (CR – *Constant Rate*). Badania laboratoryjne [1–5] oraz analizy teoretyczne potwierdziły zalety stosowania systemu VDRF. Najważniejsze z nich to niższe koszty eksploatacyjne i inwestycyjne, mniejsze straty ciśnienia przy tej samej długości cykli filtracyjnych, łatwiejsza kontrola ciśnienia, uniknięcie powstawania podciśnienia. Mętność filtratu uzyskiwanego na filtrach o skokowo zmiennej wydajności zazwyczaj

nie odbiega od otrzymywanej w systemie stałego obciążenia hydraulicznego, przy płynnie działających regulatorach natężenia przepływu wody.

Niektóre proste modele systemu VDRF nie wymagają znajomości kinetyki filtracji oraz jakości dopływającej wody, bazują jedynie na zależnościach występujących pomiędzy oporami przepływu wody tuż przed i tuż po płukaniu jednego z filtrów. W Polsce taką analizę omówiono w pracach [6–12]. W literaturze światowej na szczególną uwagę zasługuje metoda opisana przez L. di Bernardo [13,14], umożliwiającą prowadzenie praktycznych obliczeń projektowych. Podstawową zaletą tej metody jest fakt, iż w obliczeniach nie wprowadza się żadnych trudnych do określenia współczynników i że została ona zweryfikowana empirycznie. Jednocześnie liczba przyjmowanych uproszczeń jest mała i są one uzasadnione. Model ten dostarcza informacji niezbędnych do projektowania układu regulacji takich parametrów jak wysokość napełnienia nad filtrami i wielkość wahań zwierciadła wody, natomiast nie daje informacji o jakości filtratu i długości cykli filtracyjnych (dostarcza tylko informacji o ilości wody przed i po płukaniu kolejnego filtru).

Kolejny model matematyczny, opisany przez J. Arboleda [15], opiera się na trzech równaniach i uwzględnia kinetykę filtracji. Dwa z nich podają związek pomiędzy stratami wysokości ciśnienia i objętością wody przefiltrowanej przez poszczególne filtry, a trzecie opisuje bilans masy wody w układzie. Model Arboleda dostarcza więcej informacji niż metoda di Bernardo [10], gdyż pozwala wyznaczyć obciążenia hydrauliczne i straty wysokości ciśnienia w filtrze w dowolnej chwili jego pracy, a nie tylko przed i po płukaniu kolejnego filtru. Niestety nie podaje informacji o jakości filtratu, a mętność dopływającej wody uwzględniona jest w bardzo uproszczony sposób. Model ten był testowany w skali technicznej [15], ale jedynie w ograniczonym zakresie.

W modelu podanym przez F. H. Chaudhry [16,17] opisano najpierw pojedynczy filtr o zmiennej wydajności, a następnie stację VDRF. Zastosowano do tego celu równanie bilansu masy oraz równanie kinetyki, przy czym współczynnik wodoprzepuszczalności obliczono jako funkcję stężenia osadu w filtrze. Zastosowanie w modelu Chaudhry teorii filtracji skomplikowało obliczenia i wymagało wprowadzenia licznych uproszczeń i przybliżeń, jak np. posługiwanie się prostym liniowym równaniem kinetyki kołmatacji, korzystanie w obliczeniach ze średniej wartości stężenia osadu oraz nieuwzględnienie niejednorodności złoża i zawieszin. Wszystkie te uproszczenia sprawiają, iż model Chaudhry nie doczekał się zastosowań projektowych.

Na podstawie tego krótkiego przeglądu można stwierdzić, że dotychczasowe modele systemu VDRF nie pozwalają na

Dr R. I. Mackie: University of Dundee, Dundee SS1 4HN, UK

Dr hab. inż. W. Dąbrowski, prof. nadzw., mgr inż. M. Zielina: Politechnika Krakowska, Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska, ul. Warszawska 24, 31–155 Kraków

uzyskanie niektórych istotnych informacji o przebiegu procesu filtracji, takich jak np. jakość filtratu oraz długość cyklu filtracyjnego. Z uwagi na trudności we wdrożeniu metod matematycznego modelowania procesu filtracji do zastosowań praktycznych w pracy [18] zaproponowano połączenie modeli makroskopowych (fenomenologicznych) [19–22] ze współczesnymi modelami mikroskopowymi (fizykochemicznymi) [21,23,24], przy czym myślą przewodnią było otrzymanie narzędzia do matematycznego modelowania procesu filtracji, które połączy prostotę modeli makroskopowych z wnikiwością rozpatrywania sił działających na cząstki zawieszony w złożu filtracyjnym, właściwą dla modeli fizykochemicznych. W modelach fizykochemicznych rozpatruje się tzw. jednostkowe elementy złoża – UBE (*Unit Bed Element*) i analizuje przepływ zawieszin przez złoże zbudowane z wielu warstw hipotetycznych kolektorów. Poniżej sformułowano założenia poczynione podczas próby modelowania filtrów o skokowo zmiennej wydajności (VDRF) [18].

### Charakterystyka modelu

Model makroskopowy oparty jest głównie o równania bilansu masy (1) oraz równania kinetyki (2):

$$\frac{\partial \sigma_i}{\partial t} + u \frac{\partial C_i}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial x} = -\lambda_i C_i \quad (2)$$

w których:

$C_i$  – stężenie  $i$ -tego typu cząstek zawieszin (frakcji)

$t$  – czas

$x$  – współrzędna mierzona wzdłuż drogi przepływu

$\lambda_i$  – funkcja stężenia zawieszin  $\sigma_i$

$\sigma_i$  – stężenie zatrzymanych zawieszin  $i$ -tej frakcji (iloraz objętości zatrzymanych cząstek fazy stałej  $i$ -tego typu do objętości porowatego ośrodka)

$n$  – liczba typów cząstek zawieszin

Ponieważ w równaniach nie uwzględniono zjawiska sufozji (odrywania się cząstek zawieszin), ani wielkości zatrzymanych cząstek zawieszin, dlatego w konsekwencji posłużono się całkowitym stężeniem zawieszin ( $\sigma_c$ ), będącym sumą stężeń wszystkich frakcji cząstek w osadzie ( $\sigma_c = \sum \sigma_i$ ). Całkowite stężenie zawieszin ( $\sigma_c$ ) występuje w równaniu (3), które w sposób szczegółowy definiuje funkcję  $\lambda_i$  z równania kinetyki (2):

$$\lambda_i = \lambda_o + (\lambda_1 - \lambda_o) [1 - \exp(-\sigma_c^2 / \sigma_1^2)] \quad \text{dla } \sigma_c < \sigma_m$$

$$\lambda_i = \lambda_m (\sigma_g - \sigma_c) \quad \text{dla } \sigma_m \leq \sigma_c \leq \sigma_g \quad (3)$$

$$\lambda_i = 0 \quad \text{dla } \sigma_c > \sigma_g$$

gdzie:

$\lambda_o$  – początkowa wartość funkcji  $\lambda_i(\sigma_c)$  dla  $\sigma_c = 0$

$\lambda_m$  – maksymalna wartość  $\lambda_i$  ( $\lambda_m = \lambda_o + (\lambda_1 - \lambda_o) [1 - \exp(-\sigma_m^2 / \sigma_1^2)]$ )

$\sigma_c$  – całkowite stężenie zawieszin

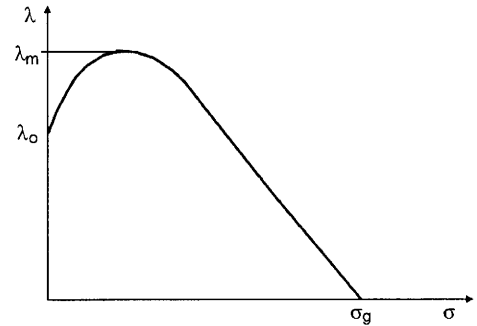
$\sigma_m$  – wartość  $\sigma_c$ , przy której  $\lambda_i$  osiąga wartość  $\lambda_m$

$\sigma_1, \lambda_1$  – wartości charakteryzujące wykres funkcji  $\lambda_i(\sigma_c)$

$\sigma_g$  – wartość  $\sigma$ , przy której  $\lambda_i = 0$

Wprowadzone w równaniu (3) oznaczenia pokazano na rysunku 1.

Wartości parametrów  $\lambda_o, \lambda_m, \sigma_m, \sigma_1$  oraz  $\lambda_1$ , charakteryzujących funkcję  $\lambda_i(\sigma_c)$ , określono w badaniach laboratoryjnych, przy czym uzyskano je dla określonych warunków procesu filtracji. Jednakże zależności występujące pomiędzy



Rys. 1. Przebieg funkcji  $\lambda=f(\sigma)$

parametrami procesu filtracji i wielkościami  $\lambda_o, \lambda_m, \sigma_m, \sigma_1$  oraz  $\lambda_1$  w modelu kapilarnym [18] pozwoliły na obliczenie wartości funkcji  $\lambda_i$  również dla innych danych wyjściowych, jak np. uziarnienie, prędkość filtracji itd.

Modele mikroskopowe oparte są na równaniach opisujących siły działające na cząstki fazy rozproszonej, z tym, że rzeczywiste tory przepływu uproszczono w nich do linii prądu, natomiast pory, przez które następuje przepływ, zastąpiono przyjętymi hipotetycznie kolektorami. Ich wymiary obliczone są na podstawie znanego uziarnienia i początkowej porowatości złoża filtracyjnego.

W omawianym modelu jako jednostkowy element zastosowano stosunkowo prosty – cylindryczny – kształt kolektora. Na jego podstawie wyznaczono zależności pomiędzy parametrami określającymi warunki filtracji (procentowy udział frakcji zawieszin, uziarnienie złoża, temperatura, wydajność stacji) i charakterystycznymi wartościami  $\lambda_o, \lambda_m, \sigma_m, \sigma_1$  i  $\lambda_1$ . Znając te zależności można rozwiązać równania (1), (2) i (3) dla dowolnych warunków filtracji. Uwzględnienie niejednorodności zawieszin i złoża filtracyjnego jest szczególną zaletą omawianego modelu.

### Weryfikacja laboratoryjna modelu

Fakt, że do modelu wprowadzono wyniki uzyskane doświadczalnie, a efekt zmieniających się warunków filtracji uwzględniono na podstawie zależności teoretycznych, pozwala przypuszczać, że model ten nie jest oderwany od rzeczywistości. Potwierdza to jego wstępna weryfikacja laboratoryjna przeprowadzona dla złożeń filtracyjnych uformowanych z kulek szklanych oraz zawieszin mikrocząstek PCW [18]. Obecnie, w ramach wspólnych projektów brytyjsko-polskich, prowadzone są badania weryfikacyjne w skali technicznej dla złożeń węgla aktywnego oraz zawieszin występujących w wodach powierzchniowych.

### Modelowanie systemu VDRF

Podjęto próbę zastosowania wyżej opisanego modelu do projektowania stacji filtrów o skokowo zmiennej wydajności (VDRF). W tym celu powiązано równanie (3) z równaniami (4) i (5), opisującymi hydraulikę systemu VDRF. Dla czystego filtru opory przepływu wyznacza się z równania:

$$h = c_{1i} q_i + c_{1i} q_i^n \quad (4)$$

gdzie:

$h$  – całkowita zmienna w czasie strata wysokości ciśnienia

$c_{1i}$  – współczynnik oporów liniowych wysokości ciśnienia w  $i$ -tym złożu filtracyjnym

$q_i$  – obciążenie hydrauliczne  $i$ -tego filtru

W filtrach o skokowo zmiennej wydajności dopływ wody surowej umieszczony jest poniżej najniższego zwierciadła wody i opory hydrauliczne dopływu są zanedbywalnie małe w porównaniu z oporami przepływu przez filtry. W wyniku tego zwierciadło wody, chociaż zmienne w czasie, układa się zawsze na jednakowym poziomie nad wszystkimi filtrami. Równanie bilansu masy wody w tego typu układach można zapisać za pomocą równania:

$$Q = \sum_{i=1}^z q_i + z \frac{dh}{dt} \quad (5)$$

gdzie:

z – liczba filtrów

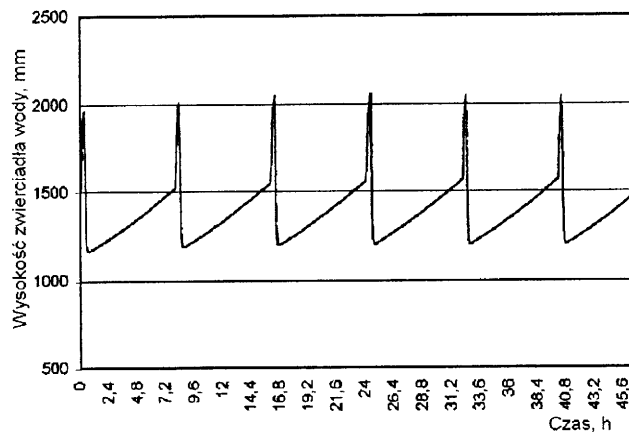
Q – iloraz natężenia dopływu wody do do stacji do powierzchni jednego z filtrów w stacji

W obliczeniach konieczne jest przyjęcie odpowiednich oporności złożeń hydraulicznych tuż po płukaniu kolejnego filtru. Podobnie jak w innych modelach matematycznych, wartości te przyjmuje się wstępnie, a następnie uściśla w trakcie obliczeń numerycznych. Skonstruowana w oparciu o omówiony model metoda projektowania stacji filtrów o skokowo zmiennej wydajności dostarcza danych ilościowych i jakościowych w dowolnej chwili pracy filtrów.

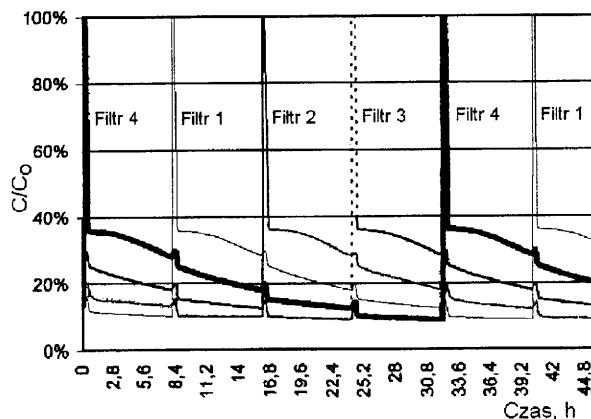
W celu weryfikacji modelu przeprowadzono serię obliczeń dynamicznie zmiennych warunków pracy filtrów o skokowo zmiennej wydajności przy użyciu programu obliczeniowego. Uzyskano zmienne w czasie przebiegi obciążeń, strat ciśnienia i pozostałych po filtracji cząstek fazy stałej (%), z uwzględnieniem poszczególnych frakcji. Wyniki te dotyczą poszczególnych filtrów z osobna, jak również całej stacji. Na przykładowych wykresach podano przebiegi obciążeń poszczególnych filtrów (rys.2), przebieg wahań zwierciadła wody nad nimi (rys.3), procent zawiesin w filtracie z pojedynczego filtru (rys.4), procent zawiesin w filtracie z całej stacji w odniesieniu do zawiesin ogółem, a także z uwzględnieniem poszczególnych frakcji (rys.5).

Na przedstawionych wykresach pokazano wyniki obliczeń dla następujących parametrów filtracji:

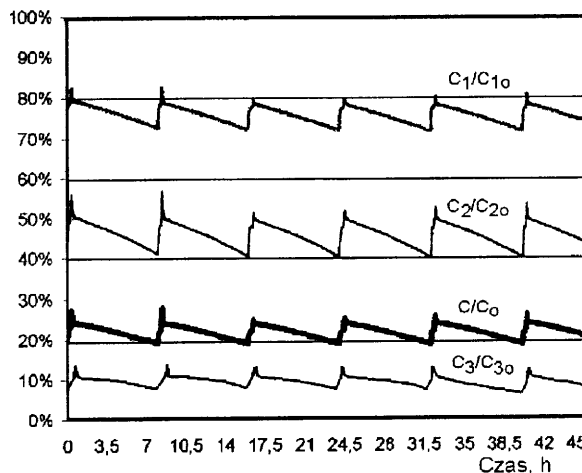
- gęstość cieczy: 1000,0 kg/m<sup>3</sup>,
- gęstość zawiesin: 1360,0 kg/m<sup>3</sup>,
- reprezentatywne promienie cząstek czterech frakcji zawiesin (1, 2, 3, 4), wyróżnionych w niejednorodnej masie zawiesin, odpowiednio: 0,45 μm, 0,90 μm, 1,80 μm, 3,60 μm,
- stężenia fazy stałej dopływającej do filtru [obj./obj.] dla cząstek czterech frakcji wyróżnionych w niejednorodnej masie zawiesin (1, 2, 3, 4), odpowiednio: 3,650·10<sup>-6</sup>, 10,800·10<sup>-6</sup>, 17,250·10<sup>-6</sup>, 11,000·10<sup>-6</sup>,
- czas pomiędzy płukaniem kolejnych filtrów: 8 h,
- czas płukania: 20 min,
- głębokość złoża: 1000 mm,



Rys. 3. Wahania zwierciadła wody nad filtrami



Rys. 4. Zawartość zawiesin w filtratach z poszczególnych filtrów

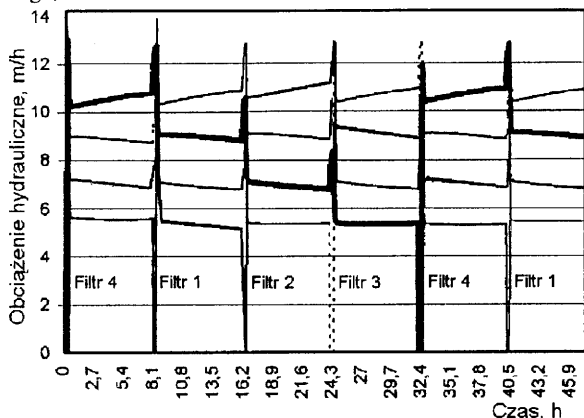


Rys. 5. Zawartość zawiesin w filtracie odpływającym z całej stacji w odniesieniu do zawiesin ogółem oraz w odniesieniu do poszczególnych frakcji (1, 2, 3, 4) o różnych wielkościach cząstek w niejednorodnej masie zawiesin

- promień ziaren w złożu na głębokościach 250 mm, 500 mm i 750 mm, odpowiednio: 0,4 mm, 0,5 mm, 0,6 mm,
- porowatość czystego złoża: 0,42,
- współczynnik oporów turbulentnych: 64000 s<sup>2</sup>/m.

### Podsumowanie

W pracy przeprowadzono analizę nowego modelu stacji filtrów o skokowo zmiennej wydajności (VDRF). Zaprezentowano przebiegi zmienności parametrów istotnych dla weryfikacji modelu, tj. obciążenia hydraulicznego i wahania zwierciadła wody oraz ilości zawiesin pozostałych po filtracji.



Rys. 2. Obciążenia hydrauliczne filtrów współpracujących skokowo zmiennie

Warunki filtracji, które przyjęto w obliczeniach były typowymi warunkami występującymi w praktyce. Ogólny przebieg zmienności oraz rząd uzyskanych wartości analizowanych parametrów były zgodne z prezentowanymi w literaturze [11,12,15,25].

Pomimo pozytywnej oceny modelu oraz jego częściowej weryfikacji w warunkach laboratoryjnych, konieczne są dowody doświadczalne na przydatność modelu w skali technicznej. Obecnie prowadzone są badania, które pozwolą na taką ocenę.

*Artykuł opracowano w ramach grantu badawczego KBN nr 3 T09C 058 18.*

#### LITERATURA:

1. D. A. CORNWELL et al: Full-scale evaluation of declining and constant rate filtration. AWWA Research Foundation, Denver, USA 1991.
2. L. di BERNARDO, J. L. CLEASBY: Declining rate versus constant rate filtration. J. Envir. Eng. Div. ASCE, 1980, 106, EE6, pp. 1023–1041.
3. J. R. BAYLIS: Variable rate filtration. Pure Water, 1959, Vol. 11, No. 5.
4. J. L. CLEASBY: Filter rate control without rate controllers. Journal AWWA, 1969, Vol. 61, No. 4, pp. 181–184.
5. J. L. CLEASBY: New ideas in filter control systems. Proc. conf. "Modern Water Treatment Methods", Pan-American Health Organization, Asuncion, Paraguay, 1972.
6. J. DROŹDŹ. Otwarte układy do filtrowania wody ze zmienną prędkością. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 1979, nr 4, tom LIII, ss. 108–110.
7. J. DROŹDŹ. Filtrowanie wody ze zmienną prędkością. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 1979, nr 1, tom LIII, ss. 18–19.
8. J. DROŹDŹ. Filtry z malejącą prędkością filtrowania – badania technologiczne i projektowe. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 1987, nr 7/8, tom LXI, ss. 159–164.
9. W. DĄBROWSKI, J. DZIOPAK: Sposób regulacji wydajności filtrów pośpiesznych (VDRF). Ochrona Środowiska, 1991, nr 2(43), s. 55.
10. W. DĄBROWSKI. Obliczenia hydraulicznej współpracy filtrów o skokowo zmiennej wydajności. Gaz Woda i Technika Sanitarna, 1995, nr 10, ss. 361–367.
11. W. DĄBROWSKI: Badania hydrauliczne stacji filtrów o zmiennej wydajności. Wyd. Politechniki Krakowskiej, monografia nr 170, Kraków 1994.
12. W. DĄBROWSKI, R. I. MACKIE: Dynamics of variable declining rate filters during backwash. Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics, 1997, Vol. 44, No. 1–4, pp. 69–83.
13. L. di BERNARDO: A rational method of design of declining rate filters. Proc. 4th World Filtration Congress, Ostend, 1986 (draft).
14. L. Di BERNARDO: Designing declining-rate filters. Filtration and Separation, 1987, pp. 338–341.
15. J. ARBOLEDA, R. GIRALDO, H. SNEL: Hydraulic behavior of declining rate filtration. Journal AWWA, 1985, Vol. 77, No. 12, pp. 67–74.
16. F. H. CHAUDHRY: Theory of declining rate filtration. I: Continuous operation. Journal of Environmental Engineering, 1987, Vol. 113, No. 4, pp. 834–851.
17. F. H. CHAUDHRY: Theory of declining rate filtration. II: Bank operation. Journal of Environmental Engineering, 1987, Vol. 113, No. 4, pp. 852–866.
18. R. I. MACKIE, Q. ZHAO: A framework for modelling removal in the filtration of polydisperse suspensions. Water Research, 1999, Vol. 33, No. 3, pp. 794–806.
19. R. I. MACKIE, R. BAI: The role of particle size distribution in the performance and modelling of filtration. Water Science and Technology, 1993, Vol. 27, No. 10, pp. 19–34.
20. R. M. W. HORNER, R. J. JARVIS, R. I. MACKIE: Deep-bed filtration – a new look at the basic equations. Water Research, 1986, Vol. 20, No. 2, pp. 215–220.
21. C. TIEN, A. C. PAYTAKES: Advances in deep-bed filtration. AIChEJ, 1979, Vol. 25, No. 5, pp. 737–759.
22. J. BODZIONY, J. LITWINISZYN: Mathematical approach to the phenomenon of colmatage of an n-fractional suspension of particles. Bulletin de l'Académie Polonaise de Sciences, 1962, Vol. 10, No. 1, p. 43.
23. R. I. MACKIE, R. M. W. HORNER, R. J. JARVIS: Dynamic modelling of deep-bed filtration. AIChEJ, 1987, Vol. 33 No. 11, pp. 1761–1775.
24. W. J. WEBER Jr.: Physicochemical processes for water quality control. A. Wiley – Interscience Series of Texts and Monographs. Wiley-Interscience, USA 1972.
25. J. L. CLEASBY: Status of declining filtration design. Water Science and Technology, 1993, Vol. 27, No. 10, pp. 151–164.

### The Unit Bed Element Approach to the Modelling of Variable Declining Rate Filters

*The UBE (Unit Bed Element) approach allows a more in-depth treatment of the behaviour of deep-bed filters. The paper describes the application of the UBE approach to VDR (Variable Declining Rate) filters. This entails combining UBE models of the filters with a hydraulic model of the VDR plant. A computer*

*program has been written to enable implementation of the model. Two main features of the model are that it takes account of both the non-homogeneity of the suspension and the stratification of the grain. Results obtained with the program are presented.*