

Michał Zielina, Wojciech Dąbrowski, Robert Ian Mackie

Analiza numeryczna wpływu temperatury wody na eksploatację filtrów o skokowo zmiennej wydajności (VDRF)

Układy regulacji filtrów pospiesznych najogólniej dzielą się na systemy z mechaniczną oraz niemechaniczną regulacją przepływu, przy czym w ostatnich latach nastąpił wyraźny wzrost zainteresowania tymi drugimi systemami. Szczególnie korzystny – pod względem ekonomicznym – jest niemechaniczny system regulacji filtrów o skokowo zmiennej wydajności, nazwany w skrócie VDRF (*Variable Declining Rate Filters*). System ten został opracowany stosunkowo dawno [1–4], zyskując zwolenników w Stanach Zjednoczonych i Ameryce Południowej. W 1993 r. w Brazylii pracowało już około 300 stacji tego typu [5]. W Polsce pierwsze prace dotyczące tego systemu filtrów zostały opublikowane w 1979 r. [3,4], a ich rozwój datuje się na lata 90. ubiegłego wieku [6–9].

W systemie VDRF doprowadzenie wody surowej położone jest poniżej najniższego zwierciadła wody występującego nad złożami współpracujących ze sobą filtrów. Dzięki temu w dowolnej chwili pracy stacji filtrów zwierciadło wody zawsze znajduje się na tym samym poziomie nad wszystkimi filtrami. Na odprowadzeniu filtratu z każdego z filtrów zamiast regulatorów założona jest kryza (lub zwężka) wytwarzająca opór przepływu w warunkach ruchu turbulენტnego. Kryza ta przeciwdziała nadmiernemu przeciążeniu złoża filtru ostatnio wypłukanego. W systemie VDRF filtry ostatnio płukane pracują przy dużo większych obciążeniach hydraulicznych, w stosunku do filtrów płukanych wcześniej. Pozwala to m.in. na uzyskanie wydajności większej niż w tradycyjnym systemie o stałym przepływie (*Constant Rate Filters* – CRF). Do zalet filtrów o skokowo zmiennej wydajności, w stosunku do zalet o stałej wydajności, należą m.in. mniejsze koszty inwestycyjne i eksploatacyjne filtrów, dłuższy cykl filtracji, przy założeniu tej samej wysokości hydraulicznych strat przepływu przez stację, mniejsza wysokość strat ciśnienia przy tej samej długości cyklu, łatwiejsza kontrola ciśnienia, wyeliminowanie regulatorów przepływu, lepsza jakość filtratu. Trzeba jednak pamiętać, że zalety te nie mogą być wykorzystane wszystkie równocześnie.

W literaturze opisano kilka modeli matematycznych filtrów pracujących w systemie VDRF [10–13]. Niestety, większość z nich nie uwzględnia – zmiennych w praktyce inżynierskiej – warunków, jak np. skład zawieszin, czy temperatura wody. W niniejszym artykule dokonano analizy wpływu obu tych parametrów na pracę stacji VDRF, przy zastosowaniu teoretycznego modelu dynamicznego procesu filtracji pospiesznej opisanego w pracy [14].

Matematyczny model stacji VDRF

Przedstawione dotychczas w literaturze wyniki badań nad filtrami o skokowo zmiennej wydajności dotyczyły głównie opisu ich hydrauliki. Mniejszą wagę natomiast przywiązywano do analizy zachodzących podczas filtracji zjawisk usuwania poszczególnych frakcji zawieszin. Począwszy od początku lat 70. ubiegłego wieku nastąpił istotny rozwój teoretycznych modeli filtracji pospiesznej [15,18,19]. W modelach tych przyrównuje się ziarna, lub też przestrzenie porów, przez które rozpatruje się przepływ w złożu, do prostych figur geometrycznych, jak np. kula lub walec. Modele te oparte są na tzw. metodzie UBE (*Unit Bed Element*), która dzieli złożo filtracyjne na szereg jednostkowych komórek, a następnie rozważa układy sił działających na cząstki stałe przepływające przez nie. W oparciu o te siły wyznacza się graniczne trajektorie przepływu cząstek oddzielające te cząstki, które zderzą się ze ścianą kolektora (ziarna) od tych, które przepłyną do następnej komórki złoża. Pozwala to na wyznaczenie efektywności zatrzymywania cząstek w poszczególnych komórkach złoża, a na tej podstawie efektywności usuwania cząstek zawieszonych w całym złożu. Umożliwia to także określenie stopnia kolmatacji złoża filtru w dowolnym momencie i na różnych głębokościach. Niektóre z wyników uzyskanych w oparciu o modele mikroskopowe [17,20] dla złoża czystego są bardzo zbliżone do wyników laboratoryjnych, natomiast żaden ze znanych wcześniej modeli tego typu nie dostarczył wyników, które byłyby wystarczająco zadowalające do opisu filtracji w kolejnych etapach, gdy złożo jest już częściowo zakolmatowane.

Model opisany w pracy [14] uwzględnia wyniki empiryczne uzyskane w określonych warunkach filtracji, które panowały podczas badań laboratoryjnych [14,20,21], natomiast zależności teoretyczne wynikające z metody UBE wykorzystuje tylko do określenia zmian wynikających z przyjęcia dowolnie założonych warunków filtracji. W ten sposób uzyskano model o możliwie małej liczbie współczynników empirycznych, nie pozbawiony zalet praktycznych. Na potrzeby niniejszej pracy model ten połączono z równaniami opisu hydraulicznego procesu stacji VDRF [22]:

$$h = c_{1i} q_i + c_2 q_i^n \quad (1)$$

$$Q = \sum_{i=1}^z q_i + z \frac{dh}{dt} \quad (2)$$

w których:

h – całkowita (zmienna w czasie) strata wysokości ciśnienia, m
 c_{1i} – współczynnik strat ciśnienia w i -tym złożu filtracyjnym, m
 c_2 – współczynnik strat ciśnienia w kryzie i drenażu, h^n/m^{n-1}
 q_i – obciążenie hydrauliczne i -tego filtru w stacji VDRF, m^3/m^2h
 n – wykładnik potęgi wysokości strat ciśnienia na kryzie i drenażu, –

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

mziel@vistula.wis.pk.edu.pl, wdabrow@usk.pk.edu.pl

Dr R. I. Mackie: University of Dundee, Department of Civil Engineering, DD1 4HN, UK, r.i.mackie@dundee.ac.uk

Q – iloraz natężenia dopływu wody do stacji przez powierzchnię jednego z identycznych filtrów, m^3/m^2h

z – liczba filtrów, –

t – czas, h

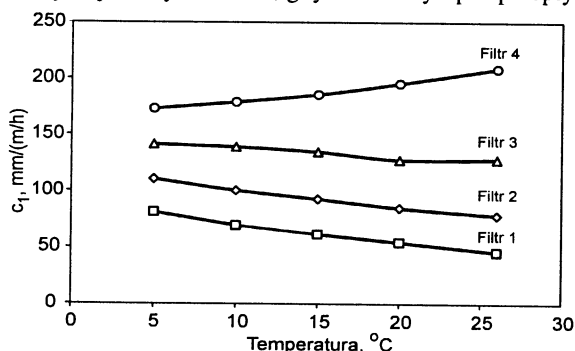
W ten sposób uzyskano dynamiczny model pracy stacji filtrów pracujących w systemie VDRF zakładający, że podczas eksploatacji filtrów przez cały czas zachowana będzie ta sama wydajność stacji oraz maksymalna wysokość oporu przepływu przez stację filtrów (H), po osiągnięciu której płucze się najbardziej zakolmatowane złożo filtracyjne. Tak skonstruowany model pozwala na przeprowadzenie szczegółowej analizy jakościowej i ilościowej filtrów pracujących w systemie VDRF. Ponieważ model ten uwzględnia takie parametry, jak współczynnik kinematycznej lepkości wody oraz gęstość wody, dlatego zastosowano go do badań wpływu zmieniającej się temperatury wody na pracę filtrów pracujących w systemie VDRF.

Wyniki analizy numerycznej

Wpływ składu i stężenia zawiesin dopływających do filtrów został przeanalizowany we wcześniejszych pracach [23,24], natomiast nie przeprowadzono dotychczas badań, które pozwoliłyby ocenić, jaki wpływ na pracę stacji VDRF może mieć zmieniająca się w czasie temperatura wody, wraz z którą zmieniają się lepkość oraz gęstość wody [25]. Analizę wpływu zmian temperatury na pracę stacji VDRF należy więc rozpatrywać w powiązaniu ze zmianami tych parametrów.

Konsekwencją zmiennej temperatury są zmienne wartości współczynnika oporności złoża filtracyjnego (c_1), zdefiniowanego jako iloraz oporu przepływu (h) przez złożo do obciążenia hydraulicznego (q) tego złoża, oraz prawie niezmiennie współczynniki oporności (c_2) drenażu i kryzy, gdzie przepływ filtratu jest turbulentny. Tak więc w wypadku stacji VDRF temperatura wody ma istotne znaczenie, zwłaszcza że w praktyce bardzo często można spotkać się z jej dużymi wahaniami związanymi z porą roku. W niektórych krajach wahania te mogą sięgać nawet $25\text{ }^\circ\text{C}$ [25]. Obserwacje przeprowadzone w krakowskich wodociągach wykazały wahaniami temperatury wody w Rudawie wynoszące w skali roku nawet $18\text{ }^\circ\text{C}$. Wraz z malejącą temperaturą wody następował wzrost oporności złoża ostatnio płukanego [25].

W oparciu o model numeryczny stacji VDRF zależność tę zobrazowano na rysunku 1 (dla parametrów złoża filtracyjnego – tab. 1 oraz charakterystyki zawiesin – tab. 2), a także jednakowych współczynników oporów przepływu w warunkach ruchu turbulentnego wytworzonych przez kryzy ($c_2=32000\text{ m}/(\text{m/s})^{1,9}$), stałego sumarycznego dopływu wody surowej do wszystkich czterech filtrów oraz przy założeniu, że najbardziej zakolmatowany filtr jest płukany wówczas, gdy całkowity opór przepływu



Rys. 1. Zależność oporności (c_1) złoża poszczególnych filtrów w stacji VDRF od temperatury wody zaraz po płukaniu filtru 1

Tabela 1. Stratyfikacja ziarna złoża filtracyjnego (wysokość 1,0 m, porowatość 42%) [26,28]

Głębokość złoża mm	Średnica ziaren mm
0	0,467
100	0,480
600	0,704
900	0,768
1000	0,832

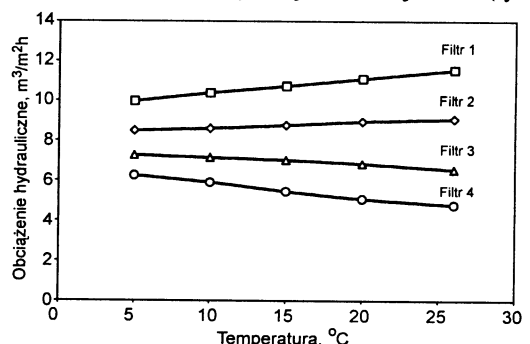
Tabela 2. Charakterystyka cząstek zawiesin dopływających do filtrów [26,28]

Typ cząstki	Rozmiar μm	Udział objętościowy*
1	0,63÷1,26	$0,9 \cdot 10^{-6}$
2	1,26÷2,52	$1,1 \cdot 10^{-6}$
3	2,52÷5,04	$2,5 \cdot 10^{-6}$
4	5,04÷10,09	$2,6 \cdot 10^{-6}$

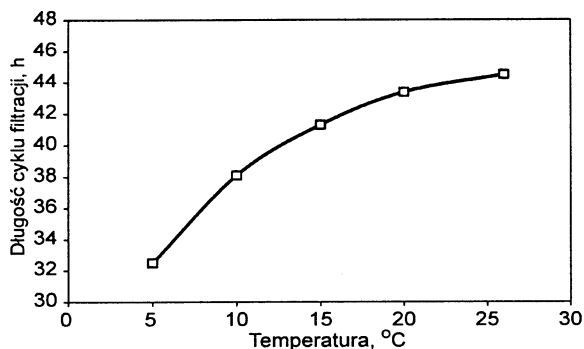
* Iloraz objętości cząstek danego typu przez objętość zawiesin (gęstość zawiesin 1360 kg/m^3)

przez stację osiągnie wartość $H=1500\text{ mm}$. Przyjęto typowe wartości parametrów złoża filtracyjnego oraz charakterystykę dopływających zawiesin, które mogą wystąpić w warunkach eksploatacji zakładu uzdatniania wody (tab. 1 i 2) [26–28].

Z wykresów zamieszczonych na rysunku 1 wynika, że wraz ze wzrostem temperatury wody oporności złoża zaraz po płukaniu (filtr 1) oraz złoża płukanych jako ostatnie (filtry 2 i 3) zmalały, natomiast wzrosła oporność złoża najbardziej zakolmatowanego (filtr 4), którego czas eksploatacji od ostatniego płukania był najdłuższy. Tak wyraźny wzrost wartości współczynnika oporów przepływu przez złożo filtru 4 wraz ze wzrostem temperatury wody związany był z towarzyszącymi wyższej temperaturze większej prędkości przyrostu tego współczynnika podczas kolmatacji oraz dłuższym cyklem filtracyjnym. Malejącej oporności wypłukanego złoża filtru 1, spowodowanej wzrostem temperatury wody, towarzyszył wzrost obciążenia hydraulicznego. Aby dla dowolnych warunków zachowana była założona na wstępie ta sama wydajność sumaryczna wszystkich czterech filtrów w stacji oraz ten sam poziom zwierciadła wody nad wszystkimi filtrami w każdym momencie ich eksploatacji, wraz ze wzrostem temperatury musi nastąpić spadek wartości obciążenia hydraulicznego złoża pozostałych filtrów, a w szczególności złoża najbardziej zakolmatowanego (filtr 4, rys. 2). W konsekwencji tego, a także charakterystycznego sposobu płukania filtrów o skokowo zmiennej wydajności, zgodnie z którym filtry płukane są wówczas, gdy całkowite opory przepływu przez stację osiągną wartość graniczną (H), zwiększającej się temperaturze wody towarzyszył wzrost długości cyklu filtracyjnego w stacji VDRF, pomimo szybszej kolmatacji złoża (rys. 3).

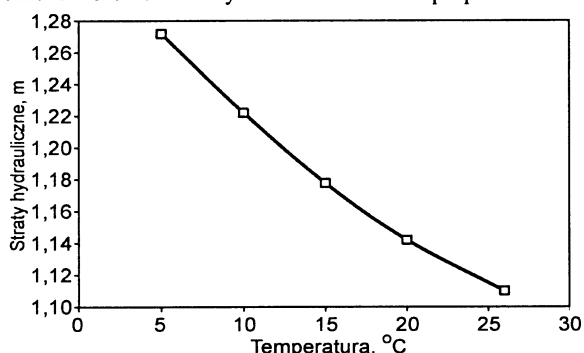


Rys. 2. Zależność obciążeń hydraulicznych (q) filtrów w stacji VDRF o różnym stopniu zakolmatowania od temperatury wody



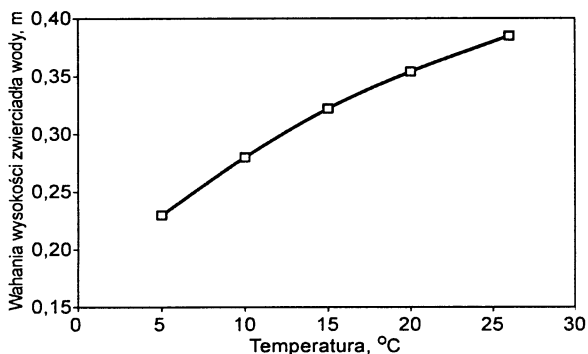
Rys. 3. Wpływ temperatury na długość cyklu pracy pojedynczego filtra w stacji VDRF, przy założeniu stałych wartości H i c_2

Przedstawione na rysunku 4 wyniki obliczeń wskazują, że dla parametrów złoża i zawiesin przedstawionych w tabeli 1 wzrost temperatury spowodował spadek całkowitej straty wysokości ciśnienia ($H-h_0$) przez stację VDRF zaraz po płukaniu najbardziej zakolmatowanego filtra, a więc także spadek poziomu zwierciadła wody nad filtrami zaraz po płukaniu.



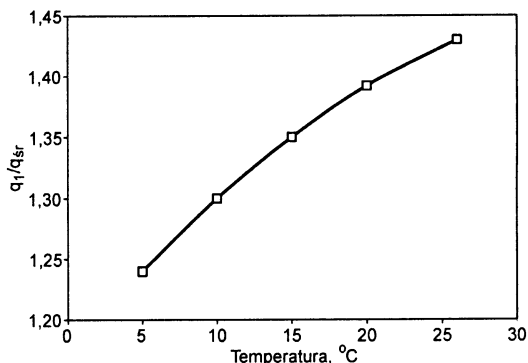
Rys. 4. Zależność całkowitej straty wysokości ciśnienia ($H-h_0$) po płukaniu kolejnego filtra w stacji VDRF od temperatury wody, przy założeniu stałej wartości $H=1500$ mm

W pracy [25], na podstawie wyników badań przeprowadzonych w skali technicznej oraz symulacji przy pomocy modelu Di Bernardo [10], sformułowano podobne wnioski dla innych parametrów pracy filtrów. Gdy wartość H pozostaje niezmienna można równocześnie powiedzieć, że wzrost temperatury wody spowoduje zwiększenie wysokości maksymalnego wahańa zwierciadła wody (h_0) nad filtrami w stacji VDRF (rys. 5).



Rys. 5. Wpływ temperatury wody na wysokość maksymalnego wahańa zwierciadła (h_0) w stacji VDRF przy stałych wartościach H i c_2

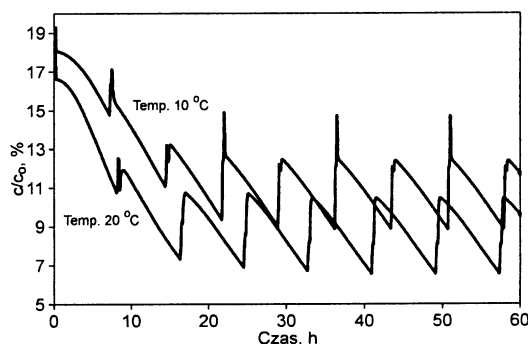
Jeżeli wahańa zwierciadła wody (h_0) wzrosną wraz ze wzrostem jej temperatury, a wartość H jest stała, to – przy uwzględnieniu reguł zaproponowanych w pracy [7], a później zweryfikowanych eksperymentalnie [29,30] – wzrost temperatury spowoduje równocześnie wzrost ilorazu największego (q_1) do średniego (q_{sr}) obciążenia hydraulicznego filtrów, równego liczbowo ilorazowi prędkości filtracji przez czysty filtr do średniej prędkości filtracji w stacji VDRF (rys. 6).



Rys. 6. Wpływ temperatury wody na iloraz q_1/q_{sr} , przy zachowaniu stałych wartości H i c_2

Widoczna na rysunku 6 tendencja do wzrostu prędkości filtracji przez czysty filtr (średnia prędkość filtracji w stacji VDRF jest taka sama) wraz ze wzrostem temperatury wynikała ze zmniejszającej się lepkości kinematycznej wody oraz sposobu eksploatacji filtrów ze skokowo zmienną wydajnością.

Chcąc zachować stałą wysokość oporów hydraulicznych (H) i nie zmieniając kryz na odpływach wraz ze wzrostem temperatury wody, konieczne było zwiększenie czasu pomiędzy płukaniem filtra. Wydłużenie tego czasu oraz wynikający również z podwyższenia temperatury wody wzrost efektywności usuwania zawiesin w złożu spowodowały poprawę jakości filtratu (rys. 7). Należy jednak pamiętać o tym, że w przeprowadzonych badaniach zadaniem filtrów miała być poprawa efektywności usuwania zawiesin w złożu.



Rys. 7. Przebieg zmienności ilorazu stężenia zawiesin odpływających (c) do stężenia zawiesin dopływających (c_0) do stacji VDRF, przy stałych wartościach H oraz c_2 i różnych temperaturach wody

Wnioski

♦ Wpływ temperatury wody może mieć istotne znaczenie dla pracy filtrów eksploatowanych w systemie VDRF. Jednakże nawet największe wahańa temperatury wody mogą powodować takie zmiany w pracy filtrów, które z technologicznego i ekonomicznego punktu widzenia będą dopuszczalne dla danej stacji. Wydaje się celowe uwzględnienie cyklicznych zmian temperatury wody już na etapie projektowania stacji filtrów.

♦ W wypadku, gdy zmiany temperatury wody mają tak duży wpływ na warunki technologiczne i ekonomiczne pracy filtrów, że uwzględnienie ich na etapie projektowania jest niewystarczające, należy dokonać zmian parametrów w trakcie ich eksploatacji, poprzez jedno z następujących działań:

– zmienić oporności (c_2) przepływu przez kryzy umieszczone na odpływach w taki sposób, aby zachować tę samą wartość ilorazu q_1/q_{sr} , zachowując równocześnie tę samą wartość oporów H ,

– dobrać nową wartość H , która pozwoli uzyskać tę samą wartość q_1/q_{sr} , nie zmieniając oporności kryz (c_2).

Działania te spowodują zmniejszenie rozbieżności z założeniami poczynionymi dla pierwotnie przyjętej temperatury. Niestety nie da się uzyskać identycznych warunków pracy filtrów pracujących w systemie VDRF niezależnie od temperatury wody, ponieważ – jak wcześniej wykazano – ma ona istotny wpływ na wartości współczynników oporności złożeń filtracyjnych.

Badania zrealizowano w ramach grantu Ministerstwa Nauki i Informatyzacji nr 1034/T09/2002/22.

LITERATURA

- H. E. HUDSON: Declining rate filtration. *Journal AWWA*, 1959, Vol. 51, No. 11, pp. 1455–1463.
- J. L. CLEASBY: Filter rate control without rate controllers. *Journal AWWA*, 1969, Vol. 61, No. 4, pp. 181–185.
- J. DROŻDŹ: Filtrowanie wody ze zmienną prędkością. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 1979, nr 1, ss. 18–19.
- J. DROŻDŹ: Otwarte układy do filtrowania wody ze zmienną prędkością. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 1979, nr 4, ss. 108–110.
- J. L. CLEASBY: Status of declining rate filtration design. *Water Science & Technology*. 1993, Vol. 27, No. 10, pp. 151–164.
- W. DĄBROWSKI: Practical approach to variable declining rate filters. *Conf. proc. "Topical Problems of Water Resources, their Optimal Exploitation and Protection"*, Bratislava 1991, pp. 105–107.
- W. DĄBROWSKI: Badania hydrauliki stacji filtrów o zmiennej wydajności. *Monografia nr 170, Politechnika Krakowska, Kraków 1994.*
- W. DĄBROWSKI, J. DZIOPAK: Sposób regulacji wydajności filtrów pospiesznych (VDRF). *Ochrona Środowiska*, 1991, nr 2, ss. 55.
- 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.
- L. DI BERNARDO: Designing declining-rate filters. *Filtration and Separation*, 1987, pp. 338–341.
- F. H. CHAUDHRY: Theory of declining rate filtration (I). *Journal of Environmental Engineering*, 1987, Vol. 113, No. 4, pp. 834–851.
- F. H. CHAUDHRY: Theory of declining rate filtration. (II). *Journal of Environmental Engineering*, 1987, Vol. 113, No. 4, pp. 852–866.
- J. ARBOLEDA, R. GIRALDO, H. SNEL: Hydraulic behaviour of declining rate filtration. *Journal AWWA*, 1985, Vol. 77, No. 12, pp. 67–74.
- 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.
- M. ZIELINA, W. DĄBROWSKI: Modelowanie filtracji pospiesznej przy użyciu metody UBE. *Czas. Techn.*, 2001, nr 3–B, ss. 202–221.
- A. C. PAJATAKES, C. TIEN, R. M. TURIAN: A new model for granular porous media: part I – model formulation. *AIChE J.*, 1973, Vol. 19, pp. 58–70.
- R. RAJAGOPALAN, C. TIEN: Trajectory analysis of deep bed filtration using the sphere-in-cell porous media model. *AIChE J.*, 1976, Vol. 22, p. 523.
- C. TIEN, A. C. PAYATAKES: Advances in deep-bed filtration. *AIChE J.*, 1979, Vol. 25, No. 5, pp. 737–759.
- Y. MATSUI, N. TAMBO: Simulation of deep filter performance for optimum design. *J. Water SRT–Aqua*, 1995, Vol. 44, No. 6, pp. 245–257.
- R. I. MACKIE, R. M. W. HORNER, R. I. JARVIS: Dynamic modelling of deep bed filtration. *AIChE J.*, 1987, Vol. 33, No. 11, pp. 1761–1775.
- R. I. MACKIE, R. BAI: Suspended particle size distribution in the performance and modelling of filtration. *Water Research*, 1992, Vol. 26, No. 12, pp. 1571–1575.
- R. I. MACKIE, W. DĄBROWSKI, M. ZIELINA: Modelowanie stacji filtrów pospiesznych o skokowo zmiennej wydajności. *Ochrona Środowiska*, 2000, nr 3, ss. 13–16.
- R. I. MACKIE, W. DĄBROWSKI, M. ZIELINA: Numerical study of a rational rule for the operation of variable declining rate filters in response to changes in raw water quality. *Environment Protection Engineering*, 2003, Vol. 29, No. 1, pp. 45–51.
- J. MARZEC, W. DĄBROWSKI: Eksploatacja filtrów pospiesznych w warunkach zmiennej mętności wody. *Ochrona Środowiska*, 1996, nr 2, ss. 19–21.
- W. DĄBROWSKI, I. MACKIE: Influence of temperature on performance of Variable Declining Rate Filters for drinking water. *Archives of Hydro-Engineering and Env. Mechanics*, 1994, Vol. 41, No. 3–4, pp. 37–51.
- W. J. WEBER: *Physicochemical Processes for Water Quality Control*. A Wiley-Interscience Series of Texts and Monographs. Wiley-Interscience, 1972.
- K. J. IVES, R. M. W. HORNER: Radial filtration. *Proc. Inst. Civ. Engrs.*, 1973, Vol. 55, pp. 229–249.
- A. L. KOWAL, M. ŚWIDERSKA-BRÓŹ: *Oczyszczanie wody*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa–Wrocław 1996.
- M. ZIELINA, W. DĄBROWSKI, R. I. MACKIE: Empiryczne badania filtrów o skokowo zmiennej wydajności. *Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN*, 2002, Vol. 11, ss. 53–68.
- M. ZIELINA, W. DĄBROWSKI, R. I. MACKIE: Empirical verification of an optimisation approach to a VDR filter plant operation. *Proc. "Int. Conf. on Hydro-Science & Engineering"*, Warsaw University of Technology, Warsaw 2002.

Zielina, M., Dąbrowski, W., Mackie, R. I. Numerical Analysis of the Temperature Impact on the Operation of Variable Declining Rate Filters. *Ochrona Środowiska* 2003, Vol. 25, No. 4, pp. 57–60.

Abstract: The study was carried out with a deep bed filtration model developed by R. I. Mackie, Dundee University, Britain. The model is based on the well known principle of the trajectory of suspended solids flow in porous media

(Unit Bed Element Method), and temperature is one of its parameters. Making use of the results obtained with this model, some changes in the operating parameters of the variable declining rate filters are proposed in order to include the water temperature variations that occur in the course of the filtration process.

Keywords: Water filtration, variable declining rate filters, temperature, viscosity.