

Krystyna M. Wojciechowska

Ocena i strojenie modelu procesu filtracji wody w złożu filtru pospiesznego

Modele procesu filtracji tworzone są na potrzeby numerycznej symulacji zjawisk zachodzących w filtrze pospiesznym, stanowiącym element zakładu produkcji wody. Praca dotyczy wyboru współczynników liczbowych występujących w modelu procesu filtracji w celu zapewnienia zgodności wyników modelowania z pomiarami wykonanymi na obiekcie rzeczywistym. Aby omawiane zagadnienia były czytelne, w pracy cytowane są również wyniki badań własnych z wcześniejszych etapów modelowania i symulacji procesu filtracji. Pełne opracowania dotyczące tych etapów, w tym analizy wrażliwości wybranych funkcji, zostały opublikowane w pracach [1–9].

Podstawowy model procesu filtracji wody w filtrze pospiesznym, sformułowany w skali makroskopowej, wyraża – z wykorzystaniem dodatkowych zmiennych traktowanych jako parametry – relacje pomiędzy zmiennymi skutkowymi $c(t, L)$, $\sigma(t, L)$ oraz $h(t, L)$ i zmiennymi przyczynowymi $v(t)$ oraz c_0 . Relacje te mają postać układu trzech cząstkowych równań różniczkowych [10–15]. W równaniach tych występują funkcje wyrażające zawartość zanieczyszczeń w wodzie dopływającej do złoża, objętościowe stężenie zanieczyszczeń odłożonych w złożu (w funkcji stężenia masowego i prędkości filtracji), a także wartość współczynnika filtracji (jako funkcji jego wartości początkowej i masowego stężenia zanieczyszczeń odłożonych w złożu) oraz straty ciśnienia (jako funkcji objętościowego stężenia zanieczyszczeń i prędkości filtracji). Funkcje te są w podejściu makroskopowym wynikiem uśrednienia mikroskopowych oddziaływań w warunkach stanu nieustalonego pomiędzy cząsteczkami zanieczyszczeń a ziarnami złoża oraz cząsteczkami pomiędzy sobą i nie mają akceptowanych ogólnie postaci analitycznych, jak również proceduralnych.

Ogólnie układ równań stanowiący model procesu filtracji nie ma rozwiązania analitycznego, a jego rozwiązanie uzyskiwane jest na drodze całkowania numerycznego. Jak wykazały wyniki wcześniejszych badań własnych [3], w przypadku rozpatrywanego układu równań stabilny schemat numeryczny uzyskuje się przez zastąpienie pochodnych cząstkowych, przez dwupunktowe różnice na prostokątnej siatce w przestrzeni argumentów (t, L) . Funkcje występujące w modelu zawierają współczynniki liczbowe, których wartości nie wynikają z praw fizycznych, dlatego nazywane są współczynnikami swobodnymi i w koncepcji pracy są wykorzystane do dopasowania wyników symulacji uzyskiwanych na podstawie modelu do danych pomiarowych.

W pracy przedstawiono – popartą symulacjami numerycznymi – propozycję metody doboru swobodnych współczynników modelu, tak żeby wyniki modelowania były możliwie bliskie wynikom pomiarów dokonanych na obiekcie fizycznym.

Ocena modelu

Model procesu filtracji oceniany jest pośrednio przez analizę wykonanych na jego podstawie symulacji. Zakłada się przy tym domyślnie, że procedury numeryczne wykorzystane podczas symulacji nie wnoszą błędów, czyli że symulacja dokładnie odzwierciedla cechy modelu. Zagadnienie błędów powodowanych procedurą całkowania numerycznego, a w szczególności wyborem przedziałów dyskretyzacji Δt i ΔL w czasie t i zmiennej przestrzennej L , było analizowane w pracy [4]. Ocena modelu na podstawie wykonanych na jego podstawie symulacji procesu, polegająca na porównaniu jakościowym lub ilościowym z dostępnymi danymi pomiarowymi, jest procesem statycznym. Wykonanie oceny wymaga zadania wartości wszystkich współczynników modelu w postaci trzech równań ze zmiennymi $c(t, L)$, $\sigma(t, L)$ i $h(t, L)$, wyboru danych pomiarowych, względem których porównywane będą wyniki symulacji, oraz wyboru funkcji będącej miarą odległości pomiędzy wynikami symulacji a danymi, z którymi są one porównywane. Im mniejsza jest wartość funkcji odległości, tym wyniki symulacji są bardziej podobne do odpowiednich danych.

Ocena jakościowa

Wyniki symulacji otrzymane przy różnych zestawach parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych procesu filtracji wody w filtrze pospiesznym, przedstawione we wcześniejszych pracach własnych [1,7,9], pozwalają na stwierdzenie, że w ocenie jakościowej model jest poprawny. Przykładowo, obserwowane rozkłady zawartości zanieczyszczeń w filtrowanej wodzie, zawartości zanieczyszczeń odłożonych w złożu i ciśnienie w złożu (wszystkie jako funkcje czasu i głębokości w złożu), mają charakter zgodny z postulowanymi w literaturze, a także z danymi eksploatacyjnymi. Jak wykazano, model uwzględnia również bardziej złożone zjawiska zachodzące w procesie filtracji, takie jak relokacja zanieczyszczeń występująca przy zmiennej prędkości filtracji oraz powstawanie podciśnienia w złożu. W zakresie zmiennej prędkości filtracji możliwa jest symulacja przy dowolnie zadanym profilu prędkości filtracji, co wykorzystano w zamieszczonych dalej eksperymentach strojenia modelu. Opracowany model umożliwi również symulację procesu filtracji przez złoża wielowarstwowe. W kontekście powyższego istotne jest

zdefiniowanie ilościowej miary podobieństwa i opracowanie metody doboru współczynników zapewniającej maksymalną wartość podobieństwa.

Ocena ilościowa

Ocena ilościowa polega na porównaniu funkcji $c(t, L)$, $\sigma(t, L)$ i $h(t, L)$ uzyskanych z symulacji z danymi pomiarowymi uzyskanymi z fizycznego procesu filtracji, zarejestrowanego na filtrach zakładu produkcji wody. Do potrzeb ilościowej oceny podobieństwa pomiędzy wynikami symulacji a danymi pomiarowymi wykorzystano funkcję podobieństwa zdefiniowaną wcześniej w pracy [7] w postaci sumy kwadratów odchyłek pomiędzy wartością otrzymaną w wyniku symulacji a odpowiadającą jej wartością pomiarową. Przyjęta funkcja ma następującą postać:

$$M(p) = \alpha_c \sum_{k=0}^{nt} \sum_{i=0}^{nL} (c(p; k, i) - c_p(k, i))^2 + \alpha_\sigma \sum_{k=0}^{nt} \sum_{i=0}^{nL} (\sigma(p; k, i) - \sigma_p(k, i))^2 + \alpha_h \sum_{k=0}^{nt} \sum_{i=0}^{nL} (h(p; k, i) - h_p(k, i))^2 \quad (1)$$

w której α_c , α_σ i α_h są współczynnikami wag, z jakimi brane są pod uwagę podobieństwa pomiędzy odpowiednią funkcją uzyskaną z symulacji (przy wybranej wartości wektora p) a odpowiadającymi jej funkcji danymi pomiarowymi. Porównywanie wykonywane jest w dyskretnych punktach przyjętej siatki, odpowiednio do struktury danych pomiarowych, zdefiniowanej listami chwil czasowych i punktów wzdłuż głębokości złoża.

Dane pomiarowe

Dane pomiarowe wykorzystywane do oceny ilościowej można podzielić na dwie grupy:

- możliwe do uzyskania w trybie on-line, to jest równocześnie z przebiegiem procesu filtracji,
- możliwe do uzyskania w trybie off-line, to jest po zakończeniu procesu filtracji, czyli w tym przypadku w tylko jednej chwili czasowej.

Dane pomiarowe on-line, ze względu na ich zakres, można zaliczyć do grupy obejmującej minimalny, średni lub maksymalny zestaw danych.

Minimalny zestaw danych pomiarowych w przypadku funkcji $c(t, L)$ obejmuje zawartość zanieczyszczeń w wodzie dopływającej i odpływającej z filtru, natomiast minimalny zestaw danych pomiarowych w przypadku funkcji $h(t, L)$ obejmuje ciśnienie w górnej i dolnej powierzchni złoża. W przypadku tego zestawu danych zakłada się, że pomiary stężenia zanieczyszczeń odłożonych w złożu w ogóle nie są dostępne. Minimalny zestaw danych jest dostępny w zakładach wodociągowych, w których dane dotyczące każdego filtru są mierzone i rejestrowane na potrzeby dokumentacyjne.

Średni zestaw danych pomiarowych w stosunku do minimalnego jest wzbogacony o rozkład ciśnień w złożu. Uzyskanie tego rozkładu wymaga użycia sondy do pomiaru rozkładu

ciśnień w złożu, której konstrukcja opisana została w pracy [1]. W literaturze takie zestawy danych rejestrowane są na stanowiskach badawczych, wyposażonych w tablice piezometrów lub sondy do pomiaru rozkładu ciśnień.

Maksymalny zestaw danych pomiarowych stanowią dane jak w zestawie średnim, uzupełnione o zawartość zanieczyszczeń w filtrowanej wodzie w wybranych chwilach czasu i na wybranych głębokościach złoża filtracyjnego. Wśród danych pomiarowych on-line we wszystkich zestawach nie ma pomiarów zanieczyszczeń odłożonych w złożu wykonywanych równocześnie z przebiegiem procesu filtracji. Pomiary takie można uzyskać dopiero po zakończeniu cyklu filtracji.

Do celów badawczych możliwe jest wykorzystanie wybranych wyników symulacji zamiast danych pomiarowych. Dane takie nazywane są symulowanymi danymi pomiarowymi. Generowanie symulowanych danych pomiarowych polega na symulacji procesu filtracji przy pewnym, arbitralnie wybranym zestawie wartości parametrów, w tym również wartości strojonych współczynników, a następnie wyborze z wyników symulacji części danych (różnych zestawów danych) traktowanych dalej jako dane pomiarowe. W przyjętej koncepcji możliwe było również zakłócanie symulowanych danych pomiarowych przez wprowadzenie addytywnego błędu, określonego przez maksymalną wartość wyrażoną w procentach wartości mierzonej (przykładowo 5%, 10% wartości mierzonej) i zmienną losową z jednostajnym rozkładem gęstości w przedziale $[-1, 1]$. Podstawową zaletą wykorzystania symulowanych danych pomiarowych w procesie strojenia był fakt, że znane były prawdziwe wartości współczynników, do których w trakcie strojenia powinny zmierzać wartości strojonych współczynników. Jak pokazały wyniki procesu strojenia, w przypadku gdy nie wprowadzono symulowanego błędu pomiarowego, wartości strojonych współczynników stawały się równe wartościom nominalnym. W przypadku wprowadzenia symulowanego błędu pomiarowego, wartości nastrojonych współczynników różniły się nieznacznie od wartości prawdziwych. Jednak w obydwu przypadkach, tj. istnienia i braku błędów pomiarowych, występowało wyraźne minimum funkcji odległości ze względu na strojone współczynniki.

W przypadku strojenia modelu do fizycznych danych pomiarowych (z filtrów zakładu Go-Cza II), ich struktura odpowiadała zestawowi minimalnemu. Stanowiły je codzinne pomiary ciśnienia w górnej i dolnej powierzchni złoża, strata ciśnienia na złożu oraz zawartość zanieczyszczeń w wodzie dopływającej do filtru. Oceniając dostępne fizyczne dane pomiarowe można również zauważyć występowanie znaczącego błędu pomiarowego. Nietypową cechą użytych danych pomiarowych było to, że dotyczyły 60-godzinnego cyklu filtracji.

W eksperymentach numerycznych poświęconych strojeniu modelu zarówno na podstawie symulowanych, jak i realnych danych pomiarowych dane definiowane są przez określenie rozmieszczenia punktów pomiarowych oraz podanie tablicy wartości odpowiednich funkcji w każdym z tych punktów. Odpowiednio do powyższego fizyczne położenie punktów pomiarowych definiowane jest przez podanie uporządkowanych rosnąco list chwil czasu oraz głębokości punktów pomiarowych w złożu. W celu skrócenia zapisów, wybrane listy chwil czasu oznaczono symbolem t wraz z numerem listy, a listy głębokości punktów symbolem L wraz z numerem listy. W przeprowadzonych badaniach numerycznych przyjęto następujące listy chwil czasowych i głębokości złoża, w których zostały wykonane pomiary:

- lista $t1\{12\}$ [h]: pomiar w połowie cyklu,
- lista $t2\{0,6, 12, 24\}$ [h]: pomiar na początku, w połowie i na końcu cyklu,
- lista $t3\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23\}$ [h]: pomiar co godzinę,
- lista $L1\{2,0\}$ [m]: pomiar przy dnie złoża,
- lista $L2\{0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9, 1,0, 1,1, 1,2, 1,3, 1,4, 1,5\}$ [m]: pomiar co 0,1 m, zaczynając od powierzchni złoża.

Możliwe są także inne listy chwil czasu i punktów wzdłuż głębokości złoża. Każda z kombinacji list chwil czasu i głębokości w złożu określa siatkę pomiarową i definiuje rozmiar macierzy, w której jako elementy występują wartości pomiarowe.

Metoda strojenia modelu

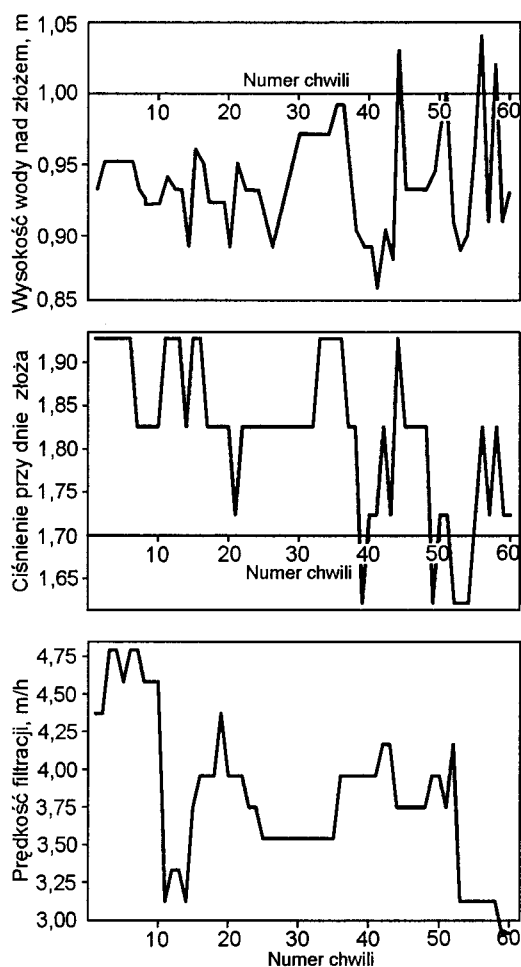
W pracy zrealizowany został automatyczny proces doboru współczynników modelu, zapewniający zgodność uzyskanych na jego podstawie wyników symulacji z danymi pomiarowymi. Proces ten nazwano metodą strojenia modelu. Współczynniki wybrane do strojenia powinny mieć wpływ na wszystkie funkcje występujące w równaniach modelu procesu filtracji, tj. opisujące zawartość zanieczyszczeń w filtrowanej wodzie, zawartość zanieczyszczeń odłożonych w złożu oraz rozkład ciśnienia w złożu. Ich liczba powinna być jak najmniejsza, a kryterium w funkcji tych parametrów powinno mieć tylko jedno minimum. Na podstawie analizy tych funkcji przedstawionej w pracy [8], jako współczynniki, za pomocą których wykonano strojenie, wybrano $c4w$ oraz a . Mając zdefiniowaną funkcję odległości pomiędzy wynikami symulacji a danymi pomiarowymi, można sformalizować problem strojenia modelu procesu filtracji, jako zminimalizowanie tej funkcji względem wybranych parametrów modelu:

$$M^* = \min_{c4w, a} M(c4w, a) \quad (2)$$

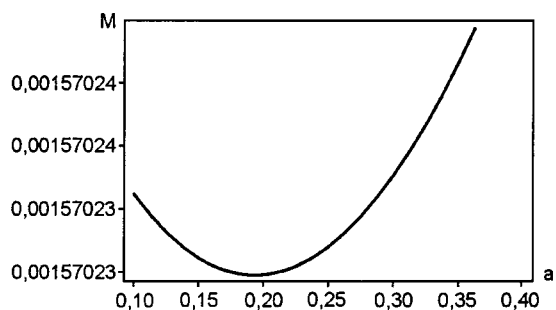
Proces strojenia modelu jest prowadzony automatycznie z wykorzystaniem numerycznej procedury minimalizacji kryterium względem współczynników. Opracowanie procesu strojenia modelu wymagało przeprowadzenia w fazie przygotowawczej odpowiednich badań numerycznych. Ponieważ w procesie strojenia modelu występuje wiele decyzji odnośnie wyboru zestawu danych pomiarowych, w tej fazie badań posłużono się tzw. symulowanymi zestawami danych pomiarowych. Dzięki temu możliwe było konfigurowanie dowolnych zestawów danych pomiarowych, a ich tworzenie nie powodowało dodatkowych kosztów.

Przykładowe wyniki

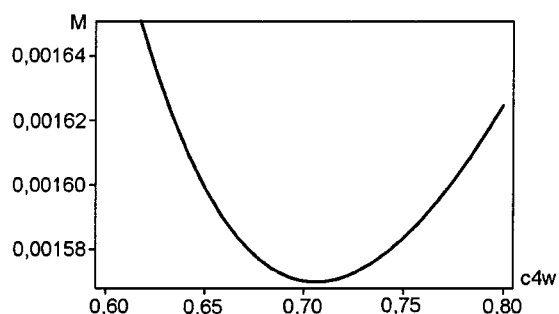
Wyniki przedstawione na rysunkach 1–6 są nielicznymi z uzyskanych w trakcie przeprowadzonych badań numerycznych i zostały wybrane pod kątem ilustracji opracowanej metodologii. Doświadczenia zdobyte w wyniku przeprowadzonych eksperymentów numerycznych, zrealizowanych z wykorzystaniem symulowanych danych pomiarowych, a w szczególności te, które dotyczyły wpływu konfiguracji pomiarów i wartości błędu pomiarowego na przebieg procesu strojenia, pozwoliły na zrealizowanie eksperymentu strojenia modelu już z użyciem rzeczywistych danych pomiarowych



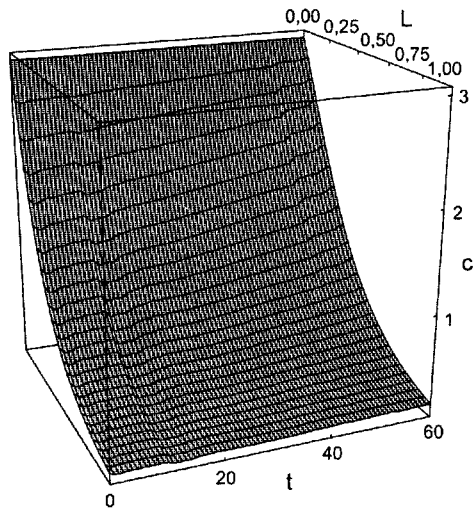
Rys. 1. Podstawowe dane pomiarowe filtru F3A1 w stacji Go-Cza II zarejestrowane co godzinę w cyklu filtracji trwającym 60 h; w celu zwiększenia czytelności dane dyskretne interpolowano liniowo



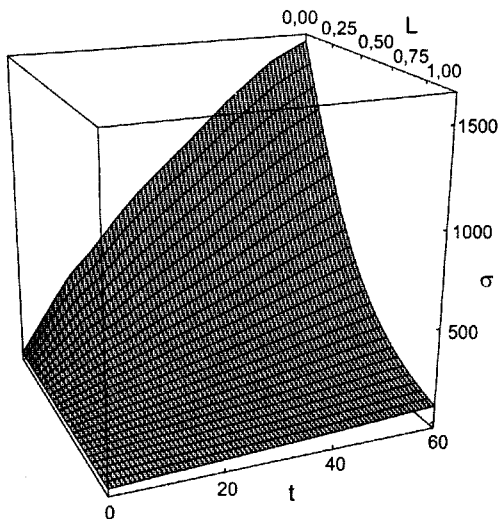
Rys. 2. Miara odległości pomiędzy wynikami symulacji a danymi pomiarowymi filtru F3A1 w stacji Go-Cza II, jako funkcja współczynnika a przy ustalonej wartości $c4w=0,703$



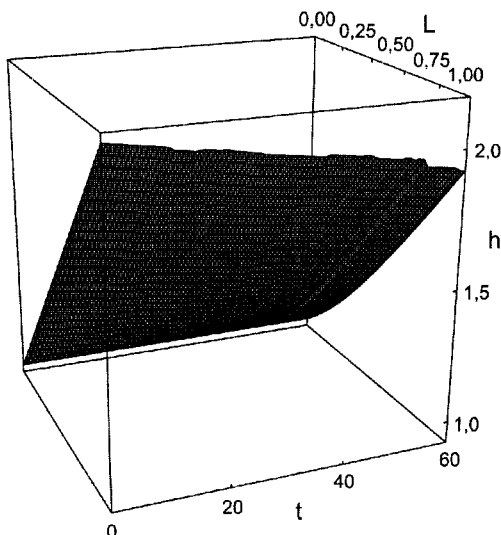
Rys. 3. Miara odległości pomiędzy wynikami symulacji a danymi pomiarowymi filtru F3A1 w stacji Go-Cza II, jako funkcja współczynnika $c4w$ przy ustalonej wartości $a=0,194$



Rys. 4. Zawartość zanieczyszczeń w filtrowanej wodzie wyznaczona na podstawie modelu z współczynnikami a oraz c4w, nastrojonymi optymalnie w przypadku filtru F3A1 w stacji Go-Cza II



Rys. 5. Zawartość zanieczyszczeń odłożonych w złożu wyznaczona na podstawie modelu z współczynnikami a oraz c4w, nastrojonymi optymalnie w przypadku filtru F3A1 w stacji Go-Cza II



Rys. 6. Ciśnienie w złożu wyznaczone na podstawie modelu z współczynnikami a oraz c4w, nastrojonymi optymalnie w przypadku filtru F3A1 w stacji Go-Cza II

pochodzących z filtrów zakładu Go-Cza II w Goczałkowicach. Mimo niekorzystnych cech charakteryzujących rzeczywiste dane pomiarowe okazało się, że możliwa była realizacja procesu strojenia, czyli wyznaczenia takich wartości strojonych współczynników, że wyniki symulacji były jakościowo i ilościowo bliskie zarejestrowanym przebiegom pomiarowym.

Podsumowanie

Przedstawiony proces doboru współczynników modelu w celu uzyskania zgodności z danymi pomiarowymi zamyka cały etap budowy modelu procesu filtracji wody w filtrze pospieszonym, wykonany i opisany w pracach [1–9]. Warto podkreślić, że o ile model w postaci ogólnej wraz ze współczynnikami swobodnymi może być dopasowany do dowolnych danych pomiarowych, to po realizacji dopasowania model odpowiada tylko jednemu szczególnemu procesowi filtracji. W przykładzie zamieszczonym w pracy był to filtr F3A1 zakładu oczyszczania wody w Goczałkowicach. W przypadku strojenia modelu do rzeczywistych danych pomiarowych prawdziwe wartości strojonych współczynników nie są znane, co utrudnia ocenę procesu strojenia, jednak fakt wyraźnego minimum funkcji odległości względem strojonych parametrów pokazuje, że proces strojenia przebiegał prawidłowo. Wykonane badania numeryczne z wykorzystaniem symulowanych danych pomiarowych wykazały, że wybrana para współczynników zapewniła wystarczającą elastyczność modelu, a w konsekwencji jego dobre dopasowanie do danych pomiarowych. Możliwe są jednak również wybory innych współczynników i kolejne badania numeryczne powinny rozstrzygnąć, jaki zestaw jest optymalny ze względu na proces strojenia.

LITERATURA

1. K.M. WOJCIECHOWSKA: Analiza, modelowanie i symulacja procesu filtracji wody dla celów projektowania i eksploatacji filtrów. Zesz. Nauk. Politechniki Śląskiej nr 1435, Gliwice 1999.
2. K.M. WOJCIECHOWSKA: Zastosowanie metod modelowania i symulacji do analizy efektywności procesu filtracji wody. Ochrona Środowiska, 2001, nr 4, ss. 13–18.
3. K.M. WOJCIECHOWSKA: Modelling and simulation of filtration in the development of water treatment technologies. Engineering Transactions IPPT PAN, 2002, No. 50, 4, pp. 323–357.
4. K.M. WOJCIECHOWSKA: Modelling and simulation of filtration process for designing and exploitation control of multilayer rapid filter. IFAC Conference Technology, Automation and Control of Wastewater and Drinking Water Systems, Gdańsk 2002, pp. 149–157.
5. K.M. WOJCIECHOWSKA: Modelowanie procesu filtracji w filtrze pospieszonym dla potrzeb symulacji numerycznej. Inżynieria i Ochrona Środowiska, 2002, t.6, nr 1, ss. 17–36.
6. K.M. WOJCIECHOWSKA: Symulacja procesu filtracji w filtrze pospieszonym, Inżynieria i Ochrona Środowiska, 2003, t. 6, nr 1, ss. 37–54.
7. K.M. WOJCIECHOWSKA: Numeryczna symulacja procesu filtracji wody w warunkach zmiennej prędkości filtracji. Ochrona Środowiska, 2005, nr 4, ss. 39–43.
8. K.M. WOJCIECHOWSKA: Koncepcja modelu i badania numeryczne dla współczynnika filtracji w procesie filtracji wody ze zmienną prędkością. Inżynieria i Ochrona Środowiska, 2006, t. 9, nr 3, ss. 315–330.

9. K.M. WOJCIECHOWSKA: Porównanie wyników symulacji procesu filtracji wody w filtrze pospiesznym dla stałej i zmiennej prędkości filtrowania. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 2006, t. 9, nr 4, ss. 421–434.
10. T.P. CAMP: Theory of water filtration. *Journal San. Eng. Div. ASCE*, 1964, No. 90.
11. J.L. CLEASBY: Filtration-back to the basics. *Proc. AWWA Seminar Coagulation and Filtration: Back to the Basic*, 1981.
12. S.S. MOHANKA: Theory of multilayer filtration. *Journal of Sanitary Eng. Div., ASCE*, 1969, No. 95.
13. C. TIEN, R.M. TURIAN, H. PENDSE: Simulation of dynamic behavior of deep bed filters. *Journal AIChE*, 1979, No. 25, p. 385.
14. W. DĄBROWSKI: Modelling declining rate filtration. *International Symposium on the Assessment Disposal and Treatment of Rural Wastes*, 1998, pp. 25–27.
15. W. ADAMSKI: Modelowanie systemów oczyszczania wód. *Wydawnictwo Naukowe PWN*, Warszawa 2002.

Wojciechowska, K.M. Evaluation and Tuning of the Water Filtration Model for a Rapid Sand Filter. *Ochrona Środowiska* 2007, Vol. 29, No. 3, pp. 35–39.

Abstract: The quality of the water filtration model for a rapid sand filter bed is evaluated in terms of the functions $c(t, L)$, $\sigma(t, L)$, $h(t, L)$, which relate the content of pollutants in the water being filtered, the content of pollutants in the filter bed and the pressure in the filter bed to time and filter depth. These functions are compared (both qualitatively and quantitatively) with analogous functions obtained with real data. The quality of the filtration model was determined indirectly, by the assessment of the numerical simulations carried out with this model. For the tuning of the water filtration model, methods were developed and tested with the aim of fitting the model to the measured data.

The method proposed for the tuning of the model parameters (which is based on the procedure of minimization with respect to the parameters being tuned) was extensively tested on simulated measured data and thereafter applied to the measured data obtained from the water production plant Go-Cza II in Goczałkowice. The data sets from Go-Cza II included hourly measurements of pressure on the upper and lower surface of the filter, head loss and the content of pollutants in the inflow. The results of the study have shown that the process of tuning the model is feasible. And this means that it is possible to determine such values of the model parameters that the data obtained by simulation are very close to the data recorded by measurements.

Keywords: Water filtration, rapid sand filter, filtration model, model tuning.