

JACEK PIEKARSKI\*

## **Blokada kolmatacyjna w procesie filtracji grawitacyjnej zawiesiny węglowej na złożu piaskowym**

### **Wprowadzenie**

Filtracja grawitacyjna to proces polegający na rozdzieleniu fazy stałej od ciekłej. Zawiesziny ścieki kierowane na złoża porowate stanowią roztwór jednofazowy lub są mieszaniną zawartych w fazie ciekłej zanieczyszczeń stałych. Zatrzymywanie takich zanieczyszczeń polega na mechanicznym działaniu warstwy filtracyjnej przez klinowanie w jej porach fazy stałej tj. kolmatację (Ives 1980; Rup 2006; Zaradny 1990). Proces kolmatacji jest zjawiskiem złożonym, w którym obok mechanicznego zatrzymania fazy stałej w złożu filtracyjnym, mogą zachodzić zjawiska kolmatacji fizycznej, chemicznej oraz biologicznej. Aby opis procesu filtracji grawitacyjnej był możliwie dokładny, niezbędne są eksperymenty prowadzone w możliwie szerokim zakresie zmienności parametrów. Opis matematyczny procesu filtracji grawitacyjnej wymaga wyznaczenia szeregu parametrów (Kowal 1996; Palica, Kocurek 2001). Dotyczy to charakterystyki zastosowanej porowatej przegrody filtracyjnej, poprzez wyznaczenie na podstawie analizy granulometrycznej średnic charakterystycznych, jak również charakterystyki przepływu medium przez złoża filtracyjne poprzez obliczenie np. współczynników filtracji, przepuszczalności oraz kolmatacji (Hotłoś, Kottowski, Ciężak 1983; Piekarski 2009b; Żurawski, Skonieczny, Koniecki 1971).

Badania przedstawione w publikacji mają charakter modelowy – podstawowy, w których zawiesina węglowa o bardzo małym zagęszczeniu początkowym stanowi nadawę na filtracyjne złoża piaskowe. Na tym etapie nie rozważa się celów aplikacyjnych. Informacje wynikające z badań mogą dotyczyć takich potencjalnych sytuacji praktycznych, w których

---

\* Dr inż., Katedra Techniki Wodno-Mułowej i Utylizacji Odpadów, Politechnika Koszalińska, Koszalin; <http://www.wbiis.tu.koszalin.pl/jacek>; [jacek@wbiis.tu.koszalin.pl](mailto:jacek@wbiis.tu.koszalin.pl)

np. przelewy z odmulników Dorra, pracujących w Zakładach Przeróbki Mechanicznej Węgla naszych kopalń, sklarowane poniżej  $1 \text{ g/dm}^3$  (tzw. „zero przemysłowe”) lub zdekantowane przelewy z osadników zewnętrznych typu odstojniki, osadniki cykliczne lub stawy mają być odprowadzane do wód powierzchniowych. Dlatego nie można wykluczyć wprowadzenia w taki system grawitacyjnych złóż piaskowych (Piecuch 1984).

Głównym celem przedstawionej pracy jest analiza procesu kolmatacji złoża na podstawie badań, w których autor wykrył zjawisko tworzenia tzw. blokad (korków) kolmatacyjnych na określonej wysokości złoża filtracyjnego, charakteryzujących się niewielką grubością oraz porowatością w stosunku do całego złoża. Wyjaśnienie mechanizmu przyczynowo-skutkowego tego zjawiska stanowi istotę pracy.

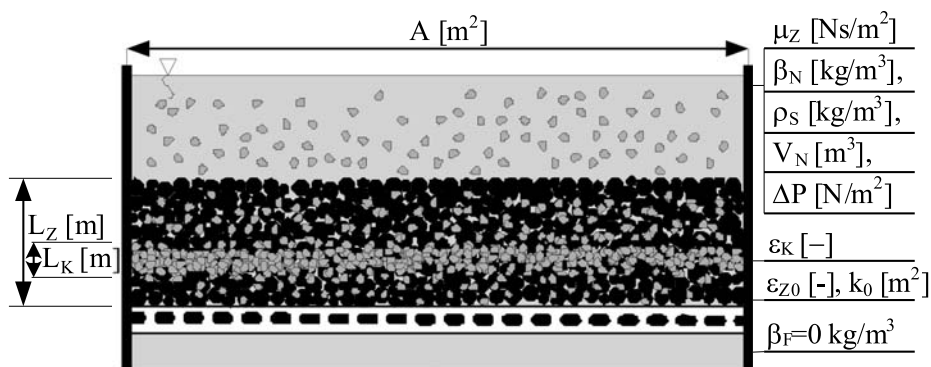
Analizując proces filtracji grawitacyjnej na podstawie ogólnego równania bilansu, które w uproszczeniu zakłada, że faza stała z zawiesiny skierowanej do procesu w ilości  $Q_{SN}$  zatrzymała się w porach warstwy filtracyjnej w ilości  $Q_{SZ}$  oraz utworzyła przegrodę kolmatacyjną w ilości  $Q_{SK}$ , jak również utworzyła osad na złożu  $Q_{SO}$  oraz przedostała się do filtratu w ilości  $Q_{SF}$ , można ogólnie zapisać (Piekarski 2009a):

$$\int_0^{Q_{SN}} dQ_{SN} - \int_0^{Q_{SF}} dQ_{SF} = A \cdot \rho_S \cdot \sum_i^n (L_i \cdot \int d\varepsilon_i) \quad (1)$$

Po uwzględnieniu w równaniu (1) poszczególnych warstw:

$$\beta_N \int_0^{V_N} dV_N - \beta_F \int_0^{V_F} dV_F = A \cdot \rho_S \cdot \left[ L_Z \int_{\varepsilon_Z}^{\varepsilon_{Z0}} d\varepsilon_Z + L_K \int_{\varepsilon_K}^{\varepsilon_Z} d\varepsilon_K + L_O \int_{\varepsilon_O}^1 d\varepsilon_O \right] \quad (2)$$

Natomiast po rozwiązaniu równania (2) różnica iloczynu zagęszczenia fazy stałej  $\beta_N$  [ $\text{kg/m}^3$ ] i objętości całkowitej  $V_N$  [ $\text{m}^3$ ] w nadawie oraz zagęszczenia fazy stałej  $\beta_F$  [ $\text{kg/m}^3$ ] i objętości całkowitej  $V_F$  [ $\text{m}^3$ ] w filtracie zależy od powierzchni złoża  $A$  [ $\text{m}^2$ ], gęstości zatrzymanej fazy stałej  $\rho_S$  [ $\text{kg/m}^3$ ], całkowitej wysokości warstwy  $L_Z$  [ $\text{m}$ ] i porowatości nieskolmatowanego  $\varepsilon_{Z0}$  [-] oraz porowatości skolmatowanego  $\varepsilon_Z$  [-] złoża filtracyjnego,



Rys. 1. Schemat procesu filtracji grawitacyjnej w złożu porowatym

Fig. 1. Diagram of gravitational filtration process on porous bed

wysokości warstwy  $L_K$  [m] i porowatości  $\varepsilon_K$  [-] fazy stałej skolmatowanej w złożu oraz wysokości warstwy  $L_O$  [m] i porowatości  $\varepsilon_O$  [-] powstałego osadu filtracyjnego:

$$\beta_N \cdot V_N - \beta_F \cdot V_F = A \cdot \rho_S \cdot [L_Z \cdot (\varepsilon_{Z0} - \varepsilon_Z) + L_K \cdot (\varepsilon_Z - \varepsilon_K) + L_O \cdot (1 - \varepsilon_O)] \quad [\text{kg}] \quad (3)$$

W rozważanym wariantcie procesu filtracji grawitacyjnej (rys. 1) następuje zatrzymanie fazy stałej z mieszaniny o zagęszczeniu  $\beta_N$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] w porach złoża filtracyjnego. W trakcie procesu w złożu o wysokości  $L_Z$  [m] zmniejsza się porowatość warstwy  $\varepsilon_Z$  [-] i jednocześnie w złożu powstaje blokada kolmatacyjna o wysokości  $L_K$  [m] i porowatości  $\varepsilon_K$  [-], przy czym  $\varepsilon_K \ll \varepsilon_Z$ . W uproszczeniu założono, że: faza stała zawarta w mieszaninie nie przedostaje się do filtratu, stąd  $\beta_F = 0 \text{ kg}/\text{m}^3$  oraz że na powierzchni złoża nie powstaje warstwa osadu, dlatego  $L_O = 0 \text{ m}$ , stąd po uwzględnieniu założeń, równanie (3) przyjmuje postać:

$$\beta_N \cdot V_N = A \cdot \rho_S \cdot [L_Z \cdot (\varepsilon_{Z0} - \varepsilon_Z) + L_K \cdot (\varepsilon_Z - \varepsilon_K)] \quad [\text{kg}] \quad (4)$$

W związku z powyższym, niniejszy model w odniesieniu do wydajności objętościowej procesu filtracji  $q_V$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] uwzględniający zależność (4) można zapisać:

$$q_V = \frac{\Delta P \cdot A}{\mu_Z \cdot \left\{ \left[ 1 + \frac{V_N \cdot \beta_N - A \cdot \rho_S \cdot (L_Z \cdot \varepsilon_{Z0} - L_K \cdot \varepsilon_K)}{A \cdot \rho_S \cdot (L_Z - L_K)} \right] \cdot \frac{L_Z}{(1 \cdot \varepsilon_{Z0}) \cdot k_0} \right\}} \quad \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \quad (5)$$

W warunkach brzegowych dla złoża nieskolmatowanego wartość wskaźnika zagęszczenia nadawy  $\beta_N = 0 \text{ kg}/\text{m}^3$  oraz wysokość warstwy  $L_K = 0 \text{ m}$ . Wówczas zachodzi zjawisko przepływu medium przez warstwę porowatą.

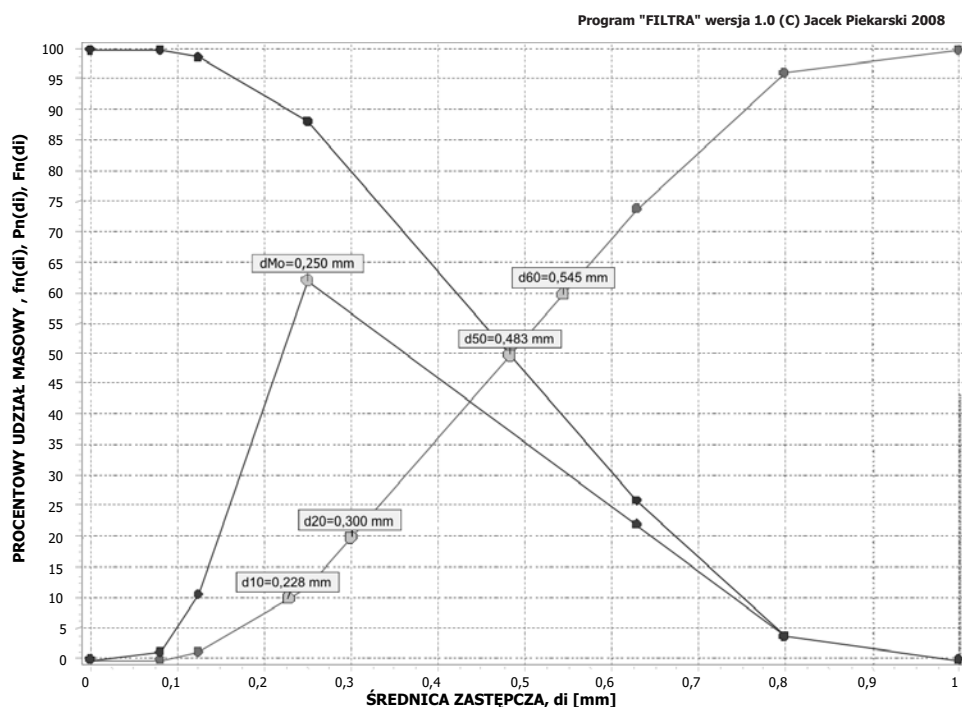
## 1. Metoda badań

Na podstawie przedstawionych równań procesu filtracji grawitacyjnej, w środowisku DELPHI 2006 zrealizowano autorski program komputerowy o nazwie FILTRA (Piekarski 2004, 2005). Aplikacja składa się z szeregu modułów, będących oddzielnymi podprogramami, które odpowiadają między innymi za rozwiązanie powyżej przedstawionych równań. Pierwszy moduł tzw. analizy granulometrycznej realizuje, na podstawie danych wstępnych, obliczenia krzywej składu ziarnowego oraz średnic charakterystycznych, które są niezbędne w trakcie obliczeń w kolejnych modułach. Wyniki zrealizowanych obliczeń, w kolejnym kroku działania aplikacji eksportuje się do modułu związanego z obliczeniami wartości współczynnika filtracji oraz przepuszczalności. Natomiast wielkości obliczone w tym module oraz module analizy granulometrycznej eksportuje się do kolejnego modułu odpowiedzialnego za obliczenia odnośnie przepływu medium przez warstwę porowatą, a także modułu związanego z obliczeniami procesu filtracji.

W ramach niniejszej publikacji przeprowadzono szereg eksperymentów z zastosowaniem jako nadawy zawiesiny węglowej. W badaniach wykorzystano materiał filtracyjny ze SUW w Koszalinie o masie 1000 g, którą na wstępie poddano analizie granulometrycznej, obliczając wartość średnic charakterystycznych tj.:  $d_{10}$ ,  $d_{20}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{60}$  oraz miarodajnej  $d_M$  i modalnej  $d_{M0}$ . Następnie każdorazowo złożo filtracyjne płukano i umieszczano w wypełnionej wodą kolumnie z przezroczystego tworzywa o średnicy  $D = 5$  cm do wysokości  $L_F = 30$  cm. W dolnej części kolumny filtracyjnej, na przewodzie o średnicy  $d = 1,6$  cm, łączącym złożo z naczyniem znajdowały się zawory odcinający oraz spustowy do poboru próbek filtratu. Zawiesinę węglową o zagęszczeniu  $\beta_N = 1000$  mg/dm<sup>3</sup> i temperaturze około  $T = 20^\circ\text{C}$  wprowadzano porcjami do kolumny do wysokości zwierciadła medium  $L_N = 17$  cm nad złożem filtracyjnym. Różnica pomiędzy początkową wysokością zwierciadła zawiesiny oraz filtratu w naczyniu przelewowym wynosiła  $h_0 = 36$  cm. Ponadto zawiesinę znajdującą się ponad złożem filtracyjnym wolno mieszano, aby zapobiec opadaniu cząstek fazy stałej i tworzeniu się nieprzepuszczalnej warstwy kolmatanta na powierzchni złoża filtracyjnego. W ramach badań, w zależności od ilości nadanej do procesu filtracji grawitacyjnej zawiesiny węglowej  $V_N$  [dm<sup>3</sup>] mierzono czas  $t$  [s] obniżania się zwierciadła nadawy w kolumnie filtracyjnej na wysokości  $L = 13$  cm dla trzech wybranych różnych frakcji fazy stałej tworzącej zawiesinę, tj.:  $\varphi_K < 0,05$  mm,  $\varphi_K < 0,063$  mm oraz  $\varphi_K < 0,125$  mm. W trakcie procesu odczytywano wysokość powstałej blokady kolmatacyjnej  $L_K$  [mm] oraz cyklicznie pobierano próbki filtratu, w których badano wartość zagęszczenia fazy stałej w filtracie  $\beta_F$  [mg/dm<sup>3</sup>]. Doświadczenie kończono w momencie znacznego wydłużenia się czasu filtracji (współczynnik kolmatacji  $\eta \approx 44$ ). W dalszej kolejności, otrzymane wielkości wprowadzono do programu FILTRA, którego wynikiem działania była analiza zmian wartości współczynnika filtracji  $K_0$  [m/s], przepuszczalności  $k_0$  [m<sup>2</sup>], masy fazy stałej w filtracie  $Q_{SF}$  [kg], masy fazy stałej znajdującej się w blokadzie kolmatacyjnej  $Q_{SK}$  [kg], masy fazy stałej zatrzymanej w złożu  $Q_{SZ}$  [kg], zagęszczenia fazy stałej w filtracie  $\beta_F$  [mg/dm<sup>3</sup>], grubości blokady kolmatacyjnej  $L_K$  [m], porowatości blokady kolmatacyjnej  $\varepsilon_K$  [-], współczynnika kolmatacji blokady  $\eta_B$  [-] oraz porowatości złoża  $\varepsilon_Z$  [-], współczynnika kolmatacji złoża  $\eta_Z$  [-], porowatości złoża z blokadą kolmatacyjną  $\varepsilon_{ZK}$  [-], współczynnika kolmatacji złoża wraz z blokadą  $\eta_{ZK}$  [-], współczynnika filtracji skolmatowanego złoża  $K_{ZB}$  [m/s], współczynnika przepuszczalności skolmatowanego złoża  $k_{ZB}$  [m<sup>2</sup>], oporu właściwego  $R_W$  [N·s/m<sup>4</sup>], średniego  $R_S$  [m<sup>-1</sup>] i ogólnego  $R_O$  [N·s/m<sup>5</sup>] złoża, prędkości przepływu  $v_p$  [m/s] oraz wydatku objętościowego  $q_V$  [m<sup>3</sup>/s] w zależności od zmiany objętości zawiesiny skierowanej do procesu  $V_N$  [m<sup>3</sup>].

## 2. Wyniki badań

Złożo filtracyjne wykorzystane do badań zjawiska kolmatacji w procesie filtracji grawitacyjnej w pierwszej serii badań poddane zostało analizie granulometrycznej, której wyniki w postaci udziału masowego, sumarycznego udziału masowego oraz średnic charakterystycznych przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Krzywa udziału masowego  $f_N(d_i)$  oraz sumarycznego udziału masowego  $F_N(d_i)$  i  $\Phi_N(d_i)$  w zależności od wielkości średnicy zastępczej  $d_i$  [ $\mu\text{m}$ ] z uwzględnieniem średnicy modalnej  $d_{Mo}$ , medialnej  $d_{ME}$ , miarodajnej  $d_{10}$ ,  $d_{20}$ ,  $d_{60}$

Fig. 2. Mass fraction curve  $f_N(d_i)$  and total mass fraction  $F_N(d_i)$  and  $\Phi_N(d_i)$  in dependence on value of substitute diameter  $d_i$  [ $\mu\text{m}$ ] taking into account modal  $d_{Mo}$ , medial  $d_{ME}$ , reliable  $d_{10}$ ,  $d_{20}$ ,  $d_{60}$  diameters

Na podstawie analizy granulometrycznej można stwierdzić, iż średnica modalna (tzw. dominanta)  $d_{MO}$  odpowiadająca maksimum krzywej udziału masowego  $f_N(d_i)$  wynosi 250  $\mu\text{m}$ . Średnica medialna (tzw. mediana)  $d_{ME}$  równa 50% udziału masowego wynosi 483  $\mu\text{m}$ , natomiast średnica miarodajna ziaren  $d_M$  wynosi 408  $\mu\text{m}$ . Pozostałe wielkości charakterystyczne wynoszą odpowiednio  $d_{10} = 228$   $\mu\text{m}$ ,  $d_{20} = 300$   $\mu\text{m}$  oraz  $d_{60} = 544$   $\mu\text{m}$ . Na podstawie badań laboratoryjnych obliczona wartość współczynnika filtracji złoża nieskolmatowanego wynosi od 2,93E-4 m/s. Dla gęstości fazy ciekłej (wody) wynoszącej  $\rho = 998,22$  kg/m<sup>3</sup> (po uwzględnieniu poprawki temperaturowej dla  $T = 20^\circ\text{C}$ ) oraz współczynnika lepkości dynamicznej wynoszącego  $\mu_Z = 1,01\text{E-}3$  Pa·s współczynnik przepuszczalności  $k_{ZB0} = 3,01\text{E-}11$  m<sup>2</sup>. Otrzymaną, na podstawie badań laboratoryjnych, wartość współczynnika przepuszczalności  $k_0$  [m<sup>2</sup>] potwierdza formuła według Kozeny-Carmana, na podstawie której – dla porowatości złoża nieskolmatowanego  $\varepsilon_0 = 0,41$  oraz średnicy  $d_{10} = 228$   $\mu\text{m}$  i współczynnika kulistości ziarna  $w_K = 0,626$  – wartość współczynnika przepuszczalności wynosi również  $k_0 = 3,01\text{E-}11$  m<sup>2</sup>. Ponadto otrzymaną wartość współczynnika filtracji  $K_0 = 2,93\text{E-}4$  m/s sprawdzono w programie FILTRA przy pomocy równań

matematycznych analityczno-empirycznych według Hazena, Krügera, Seelheima, Slichtera oraz USBSC uwzględniających wartość poprawki temperaturowej dla  $T = 20^\circ\text{C}$  i wynoszącej  $C_T = 1,30$ . Dla  $d_{10} = 228 \mu\text{m}$  oraz dla współczynnika nierównomierności uziarnienia badanego złoża  $U = 2,39$  i współczynnika empirycznego zależnego od porowatości złoża  $CH = 375$ , obliczona wartość współczynnika filtracji według formuły Hazena wynosi  $K_{H0} = 2,93\text{E-}4$  m/s, co potwierdza wartość otrzymaną na podstawie badań laboratoryjnych metodą zmiennego ciśnienia. Według formuły Krügera dla  $d_{10} = 228 \mu\text{m}$  oraz porowatości złoża  $\varepsilon_0 = 0,41$ , wartość współczynnika filtracji wynosi również  $K_{K0} = 2,93\text{E-}4$  m/s. Według formuły Slichtera uwzględniającej wartość współczynnika empirycznego zależnego od porowatości złoża nieskolmatowanego i wynoszącego  $m_{SL} = 5,35\text{E-}2$  oraz współczynnika lepkości dynamicznej fazy ciekłej (wody) wynoszącego  $\mu_0 = 1,01\text{E-}3$  Pa·s, wartość współczynnika filtracji wynosi  $K_{SL0} = 2,83\text{E-}4$  m/s. Natomiast według formuły USBSC (tzw. amerykańskiej) uwzględniającej średnicę  $d_{20} = 300 \mu\text{m}$  wartość współczynnika filtracji wynosi  $K_{U0} = 2,94\text{E-}4$  m/s, a więc w przybliżeniu odpowiada wartości tego parametru otrzymanego na podstawie badań laboratoryjnych metodą zmiennego ciśnienia. Na podstawie równania Seelheima wartość współczynnika filtracji zależna jest od średnicy medialnej  $d_{ME} = 483 \mu\text{m}$  i wynosi  $K_{S0} = 1,08\text{E-}4$  m/s.

Podsumowując, można z dużym prawdopodobieństwem stwierdzić, że nieskolmatowane złoże charakteryzuje się wartością porowatości wynoszącą  $\varepsilon_0 = 0,41$ , współczynnikiem filtracji  $K_0 = 2,93\text{E-}4$  m/s oraz przepuszczalnością  $k_0 = 3,01\text{E-}11$  m<sup>2</sup>, oporem właściwym  $R_{W0} = 3,34\text{E}7$  N·s/m<sup>4</sup>, średnim  $R_{S0} = 9,95\text{E}9$  m<sup>-1</sup> oraz ogólnym  $R_{O0} = 5,11\text{E}9$  N·s/m<sup>5</sup>, prędkością przepływu  $v_{P0} = 1,41$  m/h i wydatkiem objętościowym  $q_{V0} = 2,76$  dm<sup>3</sup>/h.

W tabeli 1 przedstawiono wyniki badań wpływu zmiany ilości nadawy  $V_N$  [dm<sup>3</sup>] o stałej wartości zagęszczenia  $\beta_N = \text{const} = 1000$  mg/dm<sup>3</sup> na zmianę grubości blokady kolmatacyjnej  $L_K$  [mm] oraz wartości zagęszczenia fazy stałej w filtracie  $\beta_F$  [mg/dm<sup>3</sup>], współczynnika kolmatacji  $\eta_{ZK}$  [-], porowatości złoża  $\varepsilon_{ZK}$  [-], współczynnika filtracji  $K$  [m/s] i przepuszczalności  $k$  [m<sup>2</sup>], oporu ogólnego  $R_O$  [N·s/m<sup>5</sup>] oraz wydatku objętościowego  $q_V$  [m<sup>3</sup>/s] w procesie filtracji grawitacyjnej na złożu porowatym zawiesiny o trzech różnych wybranych frakcjach fazy stałej kolmatanta:  $\varphi_{K1} \in \langle 0,000-0,005 \rangle$  mm,  $\varphi_{K2} \in \langle 0,000-0,063 \rangle$  mm oraz  $\varphi_{K3} \in \langle 0,000-0,125 \rangle$  mm.

W przypadku zastosowania fazy stałej kolmatanta o średnicy  $\varphi_{K1} < 0,05$  mm badania realizowano do momentu wyraźnego wzrostu czasu filtracji, który na skutek zatrzymania fazy stałej w złożu porowatym nastąpił przy ilości około  $V_N = 38$  dm<sup>3</sup> nadanej zawiesiny – tabela 1. Wartość współczynnika kolmatacji zmieniała się od  $\eta_{ZK} = 1,00$  do około  $\eta_{ZK} = 43$ , co odpowiadało zmianie wartości porowatości w zakresie od  $\varepsilon_{ZK} = 0,41$  do  $\varepsilon_{ZK} = 0,13$ .

Wartość wskaźnika zagęszczenia fazy stałej w filtracie  $\beta_F$  [mg/dm<sup>3</sup>] wzrosła maksymalnie do około 520 mg/dm<sup>3</sup> dla  $V_N = 10$  dm<sup>3</sup> nadanej zawiesiny. Wzrost wartości współczynnika kolmatacji  $\eta_{ZK}$  [-] w przedziale od 1,0 do 1,55 wynika z równomiernego zatrzymania fazy stałej z zawiesiny w całej objętości złoża filtracyjnego, na skutek znacznej różnicy wielkości frakcji ziarnowej złoża filtracyjnego oraz frakcji kolmatującej ( $d_{Mo}/=10$ ). Porowatość  $\varepsilon_{ZK}$  [-] w tym zakresie uległa obniżeniu z 0,41 do 0,36. W miarę zwiększenia

TABELA 1

Wyniki badań wpływu zmiany ilości nadawy  $V_N$  [dm<sup>3</sup>] o stałej wartości zagęszczenia  $\beta_N = \text{const} = 1000$  mg/dm<sup>3</sup> na zmianę grubości blokady kolmatacyjnej  $L_K$  [mm] oraz wartości zagęszczenia fazy stałej w filtracji  $\beta_F$  [mg/dm<sup>3</sup>], współczynnika kolmatacji  $\eta_{ZK}$  [-], porowatości złoża  $\varepsilon_{ZK}$  [-], współczynnika filtracji  $K$  [m/s] i przepuszczalności  $k$  [m<sup>2</sup>], oporu ogólnego  $R_O$  [N·s/m<sup>5</sup>] oraz wydatku objętościowego  $q_V$  [m<sup>3</sup>/s] w procesie filtracji grawitacyjnej na złożu porowatym zawiesiny o różnej frakcji węglowej fazy stałej tworzącej kolmatację:  $\varphi_{K1} \in <0,000-0,050>$  mm,  $\varphi_{K2} \in <0,000-0,063>$  mm oraz  $\varphi_{K3} \in <0,000-0,125>$  mm

TABLE 1

Results of investigations on influence of inflowing suspension amount  $V_N$  [dm<sup>3</sup>] with constant solid phase concentration  $\beta_N = \text{const} = 1000$  mg/dm<sup>3</sup> on change of colmatation blockage thickness  $L_K$  [mm] and values of solids concentration in filtrate  $\beta_F$  [mg/dm<sup>3</sup>], colmatation coefficient  $\eta_{ZK}$  [-], bed porosity  $\varepsilon_{ZK}$  [-], filtration coefficient  $K$  [m/s] and permeability  $k$  [m<sup>2</sup>], general resistance  $R_O$  [N·s/m<sup>5</sup>] and volume output  $q_V$  [m<sup>3</sup>/s] in the process of gravitational filtration on porous bed of suspension with various fraction of solid phase coal causing colmatation:  $\varphi_{K1} \in <0,000-0,050>$  mm,  $\varphi_{K2} \in <0,000-0,063>$  mm oraz  $\varphi_{K3} \in <0,000-0,125>$  mm

Frakcja kolmatanta	Objętość nadawy	Zagęszczenie fazy stałej w filtracji	Grubość blokady kolmatacyjnej	Współczynnik kolmatacji złoża wraz z blokadą	Porowatość złoża z blokadą	Współczynnik filtracji	Współczynnik przepuszczalności	Opór ogólny	Wydatek objętościowy
$\rho_i$ [mm]	$V_N$ [dm <sup>3</sup> ]	$\beta_F$ [mg/L]	$L_K$ [-]	$\eta_{ZK}$ [-]	$\varepsilon_{ZK}$ [-]	$K \cdot 10^{-6}$ [m/s]	$k \cdot 10^{-13}$ [m <sup>2</sup> ]	$R_O \cdot 10^9$ [N·s/m <sup>5</sup> ]	$q_V \cdot 10^{-10}$ [m <sup>3</sup> /s]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0-0,05	0,0	0,0	0,00	1,00	0,41	293	301	5,11	7670
	2,0	190,0	0,00	1,14	0,40	257	265	6,64	5900
	5,0	375,0	0,00	1,28	0,38	229	236	8,37	4680
	10,0	520,0	0,00	1,55	0,36	189	195	12,3	3190
	15,0	490,0	0,50	1,98	0,34	148	152	20	1960
	20,0	240,0	0,50	2,86	0,30	102	105	41,8	938
	25,0	150,0	1,00	4,23	0,27	69,3	71,3	91,4	429
	30,0	75,0	1,30	6,38	0,24	45,9	47,3	208	188
	35,0	38,0	1,50	13,56	0,19	21,6	22,2	939	41,7
	37,0	27,0	1,70	26,11	0,16	11,2	11,6	3480	11,2
38,0	23,0	1,90	43,21	0,13	6,78	6,98	9540	4,11	
0-0,063	0,0	0,0	0,00	1,00	0,41	293	301	5,11	7670
	3,0	190,0	0,00	1,27	0,38	231	237	8,24	4750
	6,0	340,0	0,00	1,41	0,37	208	214	10,2	3860
	10,0	385,0	0,00	1,62	0,36	181	186	13,4	2920
	14,0	294,0	0,40	3,42	0,29	85,7	88,2	59,7	656
	16,0	225,0	0,50	4,09	0,27	71,6	73,7	85,4	458
	20,0	125,0	0,50	5,11	0,26	57,3	59	133	294

TABELA 1 cd.

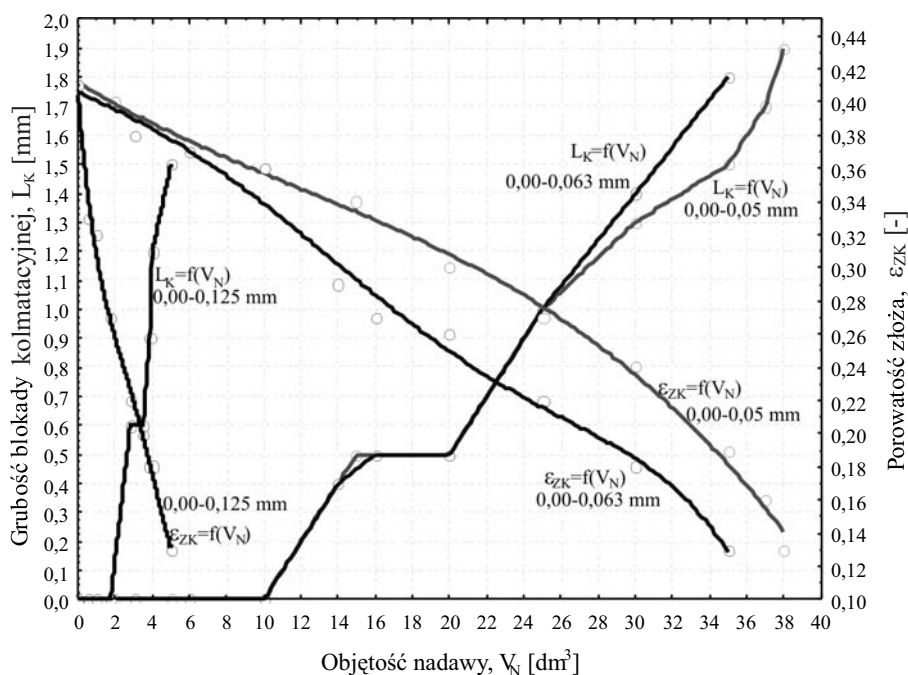
TABLE 1 cont.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	25,0	67,0	1,00	7,98	0,22	36,7	37,8	325	120
	30,0	36,0	1,40	15,63	0,18	18,8	19,3	1250	31,4
	35,0	21,0	1,80	44,02	0,13	6,66	6,85	9900	3,96
0-0,125	0,00	0,0	0,00	1,00	0,41	293	301	5,11	7670
	0,50	9,0	0,00	2,12	0,33	138	142	23,00	1710
	1,00	13,0	0,00	2,54	0,32	115	119	33,00	1190
	1,75	14,0	0,00	4,23	0,27	69,3	71,3	91,40	429
	2,80	7,0	0,60	8,42	0,22	34,8	35,8	362	108
	3,50	5,0	0,60	12,19	0,20	24	24,7	759	51,6
	3,85	4,0	0,90	15,27	0,18	19,2	19,8	1190	32,9
	4,00	3,0	1,20	16,97	0,18	17,3	17,8	1470	26,6
	5,00	2,0	1,50	44,04	0,13	6,65	6,85	9900	3,95

ilości zawiesiny nastąpił wyraźny wzrost wartości współczynnika kolmatacji  $\eta_{ZK}$  [-] w zakresie od 1,55 do około 43,21 oraz zmniejszenie wartości wskaźnika zagęszczenia fazy stałej w filtracie  $\beta_F$  [mg/dm<sup>3</sup>] do około 23 mg/dm<sup>3</sup> (rys. 4). Powyżej  $\eta_{ZK} = 1,55$  w złożu filtracyjnym nastąpiło zmniejszenie porowatości międzyziarnowej w zakresie od  $\varepsilon_{ZK} = 0,36$  do  $\varepsilon_{ZK} = 0,13$ . Zmiana wartości przedstawionych parametrów wynika z powstania na różnej wysokości złoża, blokujących przepływ, wyraźnych kilku warstw zatrzymanej fazy stałej kolmatanta. Powstała blokada kolmatacyjna charakteryzuje się punktem przegięcia zależności  $\varepsilon_{ZK} = f(V_N)$  przybliżonej przykładowo funkcją wielomianową, w wyniku aproksymacji metodą najmniejszych kwadratów, tj.:  $\varepsilon_{ZK} = 0,412 - 0,0067V_N + 0,0002V_N^2 - 4,864E-6V_N^3$ , stąd obliczona druga pochodna funkcji wynosi  $\varepsilon_{ZK}'' = 4E-4-2,918E-5V_N$ . Po przyrównaniu  $\varepsilon_{ZK}'' = 0$  obliczona wartość  $V_N \approx 14$  dm<sup>3</sup>, a więc w pewnym przybliżeniu odpowiada chwili pojawienia się w złożu filtracyjnym blokady kolmatacyjnej (rys. 3).

Analizując proces filtracji grawitacyjnej zawiesiny o frakcji fazy stałej tworzącej kolmatację w zakresie  $\varphi_2 < 0,063$  mm stwierdzono, że wyraźny wzrost czasu filtracji, na skutek zatrzymania fazy stałej w złożu porowatym, nastąpił przy ilości  $V_N = 35$  dm<sup>3</sup> nadanej zawiesiny. Wartość współczynnika kolmatacji  $\eta_{ZK}$  [-] zmieniała się od 1,00 do około 43,02. Odpowiadało to zmianie wartości porowatości w zakresie od  $\varepsilon_{ZK} = 0,41$  do  $\varepsilon_{ZK} = 0,13$ , przy której nastąpiło prawie całkowite zablokowanie przepływu. Wartość wskaźnika zagęszczenia fazy stałej w filtracie  $\beta_F$  [mg/dm<sup>3</sup>] wzrosła maksymalnie do około 385 mg/dm<sup>3</sup> dla  $V_N = 10$  dm<sup>3</sup> nadanej zawiesiny. Odnotowany niniejszy wzrost wartości współczynnika kolmatacji  $\eta_{ZK}$  [-] w przedziale od 1,00 do 1,62 wynika, podobnie jak w przypadku  $\varphi_1 < 0,05$  mm, z równomiernej koncentracji zatrzymanej fazy stałej zawiesiny w całej objętości złoża porowatego, na skutek znacznej różnicy wielkości frakcji ziarnowej złoża oraz kolmatanta ( $d_{Mo}/\bar{\rho}_1 = 8$ ). Porowatość w tym zakresie zmienności uległa obniżeniu



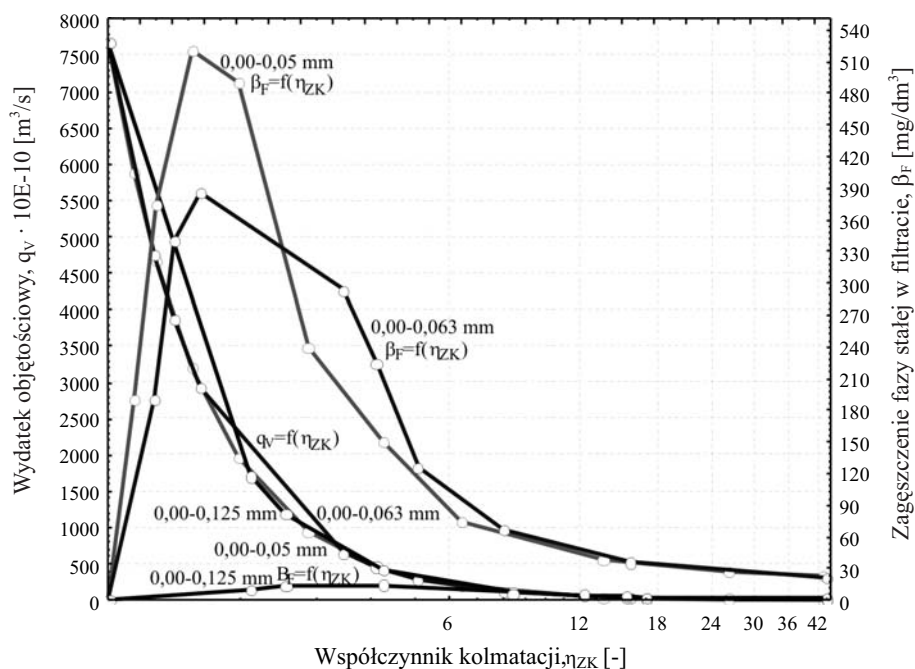


Rys. 3. Wykres wpływu zmiany ilości zawiesiny  $V_N$  [ $\text{dm}^3$ ] na grubość blokady kolmatacyjnej  $L_K$  [mm] oraz wartość porowatości złoża filtracyjnego  $\varepsilon_{ZK}$  [-] dla różnych frakcji fazy stałej kolmatanta  $\varphi_i$  [mm]

Fig. 3. Plot of influence of suspension amount  $V_N$  [ $\text{dm}^3$ ] change on thickness of colmatation blockage  $L_K$  [mm] an the value of filtration bed porosity  $\varepsilon_{ZK}$  [-] for various fractions of colmatant solid phase  $\varphi_i$  [mm]

z  $\varepsilon_{ZK} = 0,41$  do  $\varepsilon_{ZK} = 0,36$ . W miarę zwiększenia ilości nadawy nastąpił wzrost wartości współczynnika kolmatacji  $\eta_{ZK}$  [-] w zakresie od 1,62 do około 44,02 oraz zmniejszeniu uległa wartość wskaźnika zagęszczenia fazy stałej w filtracji  $\beta_F$  [ $\text{mg}/\text{dm}^3$ ] do około 21  $\text{mg}/\text{dm}^3$  (rys. 4). Powyżej  $\eta_{ZK} = 1,62$  w złożu filtracyjnym nastąpiło zmniejszenie porowatości międzyziarnowej  $\varepsilon_{ZK}$  [-] w zakresie od 0,36 do 0,13. Zmiana tych wartości wynika, podobnie jak w przypadku  $\varphi_1 < 0,05$  mm, z powstania wewnątrz złoża, warstw zatrzymanej fazy stałej kolmatanta, które skutecznie blokują przepływ. Tutaj również, moment powstania blokady kolmatacyjnej charakteryzuje się punktem przegięcia zależności  $\varepsilon_{ZK} = f(V_N)$  przybliżonej przykładowo funkcją wielomianową postaci:  $\varepsilon_{ZK} = 0,406 - 0,005V_N + 1,263E - 5V_N^2 - 3,121E - 5V_N^3 + 1,714E - 6V_N^4 - 2,56E - 8V_N^5$ . Stąd druga pochodna wynosi  $\varepsilon_{ZK}'' = 2,526E - 5 - 1,873E - 4V_N + 2,057E - 5V_N^2 - 5,12E - 7V_N^3$ . Po przyrównaniu  $\varepsilon_{ZK}'' = 0$  obliczona wartość  $V_N \approx 14 \text{ dm}^3$ , a więc również w pewnym przybliżeniu odpowiada chwili pojawienia się w złożu filtracyjnym blokady kolmatacyjnej (rys. 3).

W przypadku zastosowania fazy stałej kolmatanta w zakresie  $\varphi_3 < 0,125$  mm stwierdzono, że wyraźny wzrost czasu filtracji, na skutek zatrzymania fazy stałej w złożu porowatym nastąpił przy ilości  $V = 5 \text{ dm}^3$  nadanej zawiesiny. Współczynnik kolmatacji  $\eta_{ZK}$  [-] zmienia się od 1,00 do około 44,04; co odpowiada zmianie wartości porowatości  $\varepsilon_{ZK}$  [-] w zakresie od 0,41 do 0,13, przy której nastąpiło niemal całkowite zablokowanie przepływu. Wartość



Rys. 4. Wykres wpływu zmiany wartości współczynnika kolmatacji  $\eta_{ZK}$  [-] na wartość wydatku objętościowego  $q_V$  [ $m^3/s$ ] oraz wartość zagęszczenia fazy stałej w filtracie  $\beta_F$  [ $mg/dm^3$ ] dla różnych frakcji fazy stałej kolmatanta  $\varphi_K$  [mm]

Fig. 4. Plot of influence of colmatation coefficient  $\eta_{ZK}$  [-] value change on value of volume output  $q_V$  [ $m^3/s$ ] and value of solids concentration in filtrate  $\beta_F$  [ $mg/dm^3$ ] for various fractions of sold phase of colmatant  $\varphi_K$  [mm]

wskaznika zagęszczenia fazy stałej w filtracie  $\beta_F$  [ $mg/dm^3$ ] wzrosła maksymalnie do około  $14 mg/dm^3$  dla  $V_N = 1,75 dm^3$  nadanej zawiesiny. W przeciwieństwie do poprzednio przedstawionych frakcji kolmatanta, tutaj występuje niewielka różnica wielkości frakcji ziarnowej złoża oraz kolmatanta ( $d_{Mo}/\rho_1 = 4$ ). Wzrost wartości współczynnika kolmatacji  $\eta_{ZK}$  [-] w przedziale od 1,00 do 4,23 wynika z równomiernej koncentracji zatrzymanej fazy stałej zawiesiny jedynie w przypowierzchniowej objętości złoża porowatego. Porowatość  $\varepsilon_{ZK}$  [-] w tym zakresie zmienności uległa obniżeniu z 0,41 do 0,27 (rys. 4). W miarę zwiększenia ilości nadawy nastąpił wzrost wartości współczynnika kolmatacji  $\eta_{ZK}$  [-] w zakresie od 4,23 do około 44,04 oraz zmniejszenie wartości wskaźnika zagęszczenia fazy stałej w filtracie  $\beta_F$  [ $mg/dm^3$ ] do około  $2 mg/dm^3$  (rys. 3). Powyżej  $\eta_{ZK} = 4,23$  w złożu filtracyjnym nastąpiło zmniejszenie porowatości międzyziarnowej  $\varepsilon_{ZK}$  [-] w zakresie od 0,27 do 0,13. Zmiana tych wartości powyżej  $\eta_{ZK} = 4,23$  wynika z powstania jedynie w górnej części złoża porowatego, blokującej przepływ, pojedynczej warstwy zatrzymanej fazy stałej kolmatanta. Moment powstania blokady kolmatacyjnej charakteryzuje się punktem przebiegu zależności  $\varepsilon_{ZK} = f(V_N)$  przybliżonej równaniem:  $\varepsilon_{ZK} = 0,4044 - 0,1385V_N + 0,0517V_N^2 - 0,0113V_N^3 + 0,0009V_N^4$ . Stąd obliczona druga pochodna wynosi  $\varepsilon_{ZK}'' =$

$= 0,1034 - 6,78E - 2V_N + 1,08E - 2V_N^2$ . Po przyrównaniu  $\varepsilon_{ZK}'' = 0$  obliczona wartość  $V_N \approx 3,6 \text{ dm}^3$ , a więc również w pewnym przybliżeniu odpowiada chwili pojawienia się w złożu filtracyjnym blokady kolmatacyjnej (rys. 3).

### Wnioski

Kolmatacja w procesie filtracji grawitacyjnej zależy między innymi od wielkości uziarnienia fazy stałej znajdującej się w zawieszynie.

1) Badania wykazały, iż frakcja najdrobniejsza kolmatanta o uziarnieniu  $\varphi_1 < 0,05 \text{ mm}$  oraz  $\varphi_2 < 0,063 \text{ mm}$ , w miarę wzrostu ilości nadanej zawieszyny od  $V_N = 0 \text{ dm}^3$  ( $\eta_{ZK} = 1,0$ ) do około  $V_N = 10 \text{ dm}^3$  ( $\eta_{ZK} = 1,55$  (1,62)), została zatrzymana całej objętości złoża filtracyjnego. Po przekroczeniu  $V_N = 10 \text{ dm}^3$  nastąpiło powstanie na różnej wysokości złoża kilku tzw. blokad kolmatacyjnych ograniczających przepływ. Natomiast w przypadku frakcji ziarnowej kolmatanta  $\varphi_3 < 0,125 \text{ mm}$ , w miarę wzrostu ilości nadanej zawieszyny od  $V_N = 0 \text{ dm}^3$  ( $\eta_{ZK} = 1,0$ ) do około  $V_N = 1,75 \text{ dm}^3$  ( $\eta_{ZK} = 4,23$ ), frakcja stała uległa zatrzymaniu już w warstwie przypowierzchniowej złoża filtracyjnego.

2) W przypadku trzech rozpatrywanych frakcji ziarnowych kolmatanta, w wyniku tworzenia się blokad kolmatacyjnych na różnej wysokości złoża, a tym samym w miarę wzrostu wartości współczynnika kolmatacji od  $\eta_{ZK} = 1$  do około  $\eta_{ZK} = 44$ , wartość wskaźnika porowatości złoża ziarnistego uległa obniżeniu z  $\varepsilon_{ZK} = 0,41$  do około  $\varepsilon_{ZK} = 0,13$ . Natomiast wartość oporu ogólnego złoża wzrosła z  $R_O = 5,11E9 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^5$  do około  $R_O = 9780E9 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^5$ , a tym samym prędkość przepływu uległa obniżeniu z  $v_P = 1,41 \text{ m}/\text{h}$  do  $v_P = 7,52E-4 \text{ m}/\text{h}$  oraz wydatek objętościowy zmniejszył się z  $q_V = 2,76 \text{ dm}^3/\text{h}$  do  $q_V = 1,48E-3 \text{ dm}^3/\text{h}$ .

3) Na podstawie badań oraz analizy w programie FILTRA stwierdzono, że odnotowany moment powstania blokad kolmatacyjnych charakteryzował się punktem przegięcia zależności  $\varepsilon_{ZK} = f(V_N)$ . Ponadto zmiana wartości wskaźnika porowatości złoża  $\varepsilon_{ZK}$  [-] w zależności od zagęszczenia fazy stałej w nadawie  $\beta_N$  [ $\text{mg}/\text{dm}^3$ ], przybliżona funkcją np. wielomianową, charakteryzowała się punktem przegięcia w miejscu występowania ekstremum odnośnie rozpatrywanego wskaźnika zagęszczenia fazy stałej w filtracie  $\beta_F$  [ $\text{mg}/\text{dm}^3$ ], tj.:  $\varepsilon_{ZK}'' = f(V_N) = 0 \rightarrow \beta_F = f(V_N) \approx \text{max}$ .

### LITERATURA

- Hotłoś H., Kotowski A., Ciężak J., 1983 – Wpływ procesu kolmatacji i odkładania się osadów na wodochłonność basenów infiltracyjnych na przykładzie ujęć wodociągowych m. Wrocławia. Ochrona Środowiska, PZITS nr 402, T.II.
- Ives K.J., 1980 – Deep Bed Filtration – Theory and Practise. Filtration & Separation 17, March-April.
- Kowal A., 1996 – Odnowa wody – podstawy teoretyczne procesów. Podręcznik Politechniki Wrocławskiej.
- Palica M., Kocurek J., 2001 – Wybrane zagadnienia teorii filtracji i kompresji osadów. Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.

- Piecuć T., 1984 – Studium teoretyczne procesu filtracji grawitacyjnej wraz z informacją o aktualnych problemach gospodarki wodnej i ściekowej. Monografia Polskiego Towarzystwa Nauk o Ziemi, Częstochowa.
- Piekarski J., 2004 – Wybrane przykłady obliczeń komputerowych zastosowanych w inżynierii środowiska. Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej.
- Piekarski J., 2005 – Analiza geometryczna modelu procesu filtracji grawitacyjnej na różnych złożach przy zjawisku kolmatacji osadu. Monografia Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, Vol. 11.
- Piekarski J., 2009a – Analiza wybranych parametrów kolmatacji w procesie filtracji grawitacyjnej. Rocznik Ochrony Środowiska t. 11.
- Piekarski J., 2009b – Investigations on colmatation during filtration process on the porous deposit. Polish Journal of Environmental Studies.
- Rup K., 2006 – Procesy przenoszenia zanieczyszczeń w środowisku naturalnym. WNT.
- Zaradny H., 1990 – Matematyczne metody opisu i rozwiązań przepływu wody w nienasyconych i nasyconych gruntach i glebach. Wydawnictwo Instytutu Budownictwa Wodnego, 23.
- Żurawski M., Skonieczny J., Koniecki A., 1971 – Współczynnik filtracji – zmodyfikowana metoda Kamieńskiego. Zeszyty Naukowe UAM, Poznań.

**BLOKADA KOLMATACYJNA W PROCESIE FILTRACJI GRAWITACYJNEJ ZAWIESINY WĘGLOWEJ NA ZŁOŻU PIASKOWYM**

**Słowa kluczowe**

Filtracja grawitacyjna, kolmatacja, modelowanie komputerowe

**Streszczenie**

Zjawisko kolmatacji w procesie filtracji polega na mechanicznym zatrzymaniu fazy stałej w złożu porowatym. Jednocześnie mogą zachodzić zjawiska kolmatacji fizycznej, chemicznej oraz biologicznej. Kolmatacja fizyczno-chemiczna wywołana jest adsorpcją cząstek fazy stałej ścieków na powierzchni ziaren warstwy filtracyjnej, najczęściej w warunkach polaryzacji elektrostatycznej tych ziaren. Kolmatacja chemiczna wywołana jest osadzeniem się na ziarnach warstwy filtracyjnej osadu w postaci węglanów wapnia i związków żelaza oraz innych substancji mineralnych nierozpuszczalnych w danych warunkach. Proces kolmatacji chemicznej potęguje się wraz ze wzrostem prędkości przepływu. Kolmatacja biologiczna wywołana jest zatrzymaniem w osadzie bakterii, których aktywność może zwiększyć proces kolmatacji. Analiza wpływu poszczególnych parametrów na przebieg kolmatacji w procesie filtracji pozwala stwierdzić, że precyzyjny opis tego zjawiska jest bardzo trudny, dlatego niezbędne są eksperymenty w możliwie szerokim zakresie zmienności parametrów, tak aby opis procesu filtracji był możliwie dokładny.

**COLMATATION BLOCKAGE DURING GRAVITATIONAL FILTRATION PROCESS OF COAL SUSPENSION ON SAND BED**

**Key words**

Gravitational filtration, colmatation, computer modeling

**Abstract**

Colmatation during filtration process consists in mechanical stopping of solids in the porous deposit. Three types of colmatation may take place in the same time: physical, chemical and biological. Physical and chemical colmatation is caused by adsorption of solids from wastewater on the surface of grains of filtration layer, most

often under conditions of electrostatic polarization of those grains. Chemical colmatation is caused by embedding of calcium carbonates, iron compounds and other mineral substances indissoluble under given conditions on grains of filtration layer. The process of chemical colmatation increases along with the growth of flow velocity. Biological colmatation is caused by stopping bacteria in the filtration layer. Bacteria activity can enlarge the colmatation process. Analysis of the influence of individual parameters on the colmatation during filtration process allows to affirm that the precise description of this phenomenon is very difficult, that is why experiments in as wide as possible range of parameters variability in order to create accurate description of the filtration process.

