

Analiza wybranych parametrów kolmatacji w procesie filtracji grawitacyjnej

*Jacek Piekarski
Politechnika Koszalińska*

1. Wprowadzenie

Filtracja to proces technologiczny polegający na rozdzieleniu fazy stałej od cieklej. Ścieki kierowane do procesu filtracji grawitacyjnej stanowią roztwór chemiczny jednofazowy lub są mieszaniną zawartych w fazie cieklej zanieczyszczeń stałych (układ dwufazowy – ciekły) [4, 6]. Zatrzymywanie zanieczyszczeń ze ścieków o charakterze mieszaniny polega na mechanicznym działaniu warstwy filtracyjnej, przez klinowanie w jej porach zanieczyszczeń stałych tj. kolmatację [8, 10]. Proces kolmatacji jest zjawiskiem złożonym, w którym obok mechanicznego zatrzymania fazy stałej w złożu porowatym, mogą zachodzić zjawiska kolmatacji fizycznej, chemicznej oraz biologicznej [2, 3]. 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 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 [12]. Analiza wpływu poszczególnych parametrów na przebieg procesu filtracji pozwala stwierdzić, że precyzyjny opis filtracji jest trudny, dlatego niezbędne są eksperymenty prowadzone w możliwie szerokim zakresie zmienności parametrów, by opis procesu filtracji był możliwie dokładny [1, 5, 7, 9].

Celem niniejszej pracy była analiza wpływu wielkości uziarnienia frakcji stałej tworzącej kolmatację na zmianę wartości zagęszczenia masowego fazy stałej oraz współczynnika filtracji i kolmatacji w procesie filtracji grawitacyjnej na złożu porowatym.

2. Metoda badań

W ramach badań przeprowadzono cykl eksperymentów z zastosowaniem jako nadawy zawiesiny węglowej o zagęszczeniu $\beta_N=1000 \text{ mg/dm}^3$. Wykorzystano złożo filtracyjne ze SUW w Koszalinie o charakterystyce przedstawionej w tabeli 1 oraz na rysunku 2. Złożo filtracyjne każdorazowo umieszczano w wypełnionym wodą cylindrze z przezroczystego tworzywa o średnicy $D=5 \text{ cm}$, wolno zasypując go małymi partiami piasku, który w sposób naturalny osadzał się na dnie. Kolumna wypełniana była złożem filtracyjnym do wysokości $L_F=30 \text{ cm}$ (1478 g piasku krzemionkowego). W dolnej części kolumny filtracyjnej, na przewodzie o średnicy $d=1,6 \text{ cm}$, łączącym złożo z naczyniem przelewowym umieszczono zawór odcinający oraz zawór spustowy do poboru próbek filtratu. Następnie porcjami do kolumny wprowadzano zawiesinę węglową o zagęszczeniu $\beta_N=1000 \text{ mg/dm}^3$ i temperaturze około $T=21^\circ\text{C}$ do wysokości zwierciadła medium $L_N=17 \text{ cm}$ nad złożem filtracyjnym. Wybór węgla jako frakcji stałej tworzącej zawiesinę kolmatacyjną, wynikał z kontrastu koloru w stosunku do złoża, i tym samym łatwości obserwacji zjawiska kolmatacji w procesie filtracji grawitacyjnej. Różnica pomiędzy początkową wysokością zwierciadła zawiesiny oraz zwierciadłem filtratu w naczyniu przelewowym wynosiła $h_0=36 \text{ cm}$. Zawiesinę ponad złożem filtracyjnym mieszano aby zapobiec opadaniu cząstek fazy stałej i tworzeniu się nieprzepuszczalnej warstwy kolmatanta na powierzchni złoża filtracyjnego.

W serii badań mierzono czas t [s] obniżania się zwierciadła nadawy w kolumnie filtracyjnej na wysokości $L=13 \text{ cm}$ w zależności od ilości przefiltrowanego medium V [cm^3] dla trzech frakcji fazy stałej tworzącej zawiesinę, tj.: $\varphi_K < 0,04 \text{ mm}$, $\varphi_K \in < 0,063 \div 0,08 > \text{ mm}$; $\varphi_K \in < 0,08 \div 0,125 > \text{ mm}$. Następnie wykonano badania wartości wskaźnika zagęszczenia β_F [mg/dm^3] filtratu. Doświadczenie kończono w momencie znacznego wydłużenia się czasu filtracji.

W trakcie pomiaru różnica wysokości hydraulicznych $\Delta H(t) = H_A(t) - H_B$, wymuszająca przepływ zawiesiny przez warstwę porowatego materiału filtracyjnego ulegała zmianie. W rezultacie zmieniał się strumień objętości $q_V(t)$ przepływającej zawiesiny. W takich doświadczalnych warunkach równanie wg Darcy'ego, umożliwiające wyznaczenie strumienia objętościowego q_V , przyjmuje postać:

$$q_V(t) = K \cdot A \cdot \Delta H(t) \cdot L_F^{-1} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1)$$

gdzie:

K – współczynnik filtracji, [m/s],

A – powierzchnia filtracji, [m^2],

ΔH – różnica wysokości hydraulicznych, [m],

L_F – wysokość warstwy filtracyjnej, [m].

gdzie:

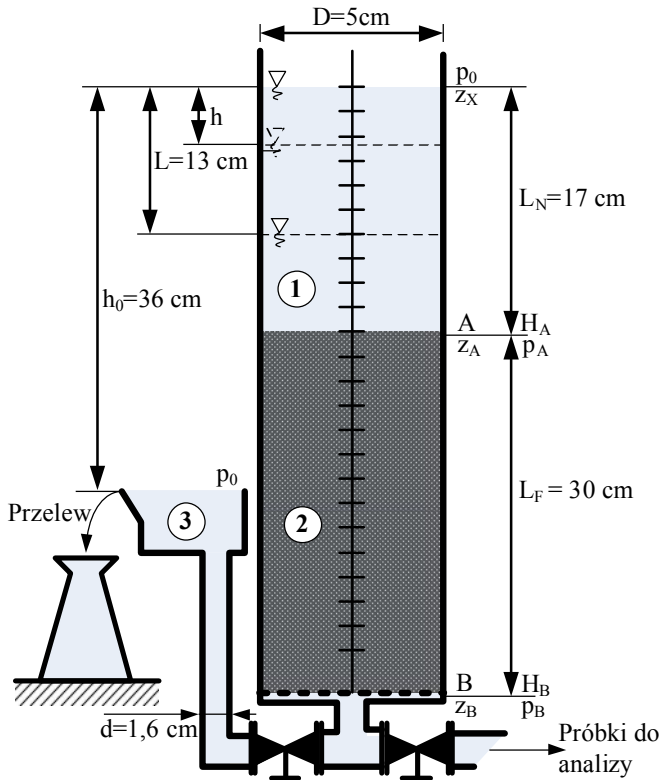
$$\Delta H(t) = H_A - H_B \quad [\text{m}] \quad (2)$$

Uwzględniając wysokości hydrauliczne H_A i H_B wynoszące:

$$H_A = (p_0 + \gamma \cdot (z_x - z_A)) \cdot \gamma^{-1} + z_A \quad [\text{m}]; \quad H_B = (p_0 + \gamma \cdot (z_x - (h(t) + z_B))) \cdot \gamma^{-1} + z_B \quad [\text{m}] \quad (3)$$

z różnicy $\Delta H(t)$ (2) oraz podstawienia (3) do (1) wynika:

$$q_V(t) = K \cdot A \cdot h(t) \cdot L_F^{-1} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4)$$



Rys. 1. Schemat stanowiska laboratoryjnego do badań współczynnika kolmatacji w procesie filtracji grawitacyjnej (1 – porcja zawiesiny, 2 – złoże filtracyjne, 3 – naczynie przelewowe)

Fig. 1. Test stand for research on colmatation coefficient during gravitational filtration process (1 – suspension, 2 – filtration bed, 3 – overflow vessel)

Strumień objętościowy zawiesiny przez filtracyjną warstwę porowatą nazywany również wydatkiem filtracyjnym, zależy od szybkości ruchu medium w przewodzie łączącym kolumnę filtracyjną z naczyniem przelewowym. Zwierciadło medium obniży się w czasie dt [s] o wysokość dh [m], w związku z tym, można zapisać:

$$q_V = a \cdot \frac{dh}{dt} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5)$$

Po uwzględnieniu (4) i (5) oraz uporządkowaniu w granicach od $h=h_0$ [m] (początkowa wysokość zwierciadła nadawy po czasie $t=0$ s) do $h=h_K$ [m] (końcowa wysokość zwierciadła nadawy po czasie $t=t_K$) otrzymuje się:

$$\int_{h_0}^{h_K} \frac{dh}{h} = \frac{K}{L_F} \cdot \frac{A}{a} \cdot \int_0^{t_K} dt \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (6)$$

Rozwiązaniem równania jest wyrażenie, które na podstawie pomiaru czasu t_K [s], w którym powierzchnia zwierciadła medium przemieści się z wysokości h_0 [m] na wysokość h_K [m] umożliwia wyznaczenie współczynnika filtracji K [m/s]:

$$K = - \frac{L_F}{t_K} \cdot \frac{A}{a} \cdot \text{Ln} \left(\frac{h_K}{h_0} \right) \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (7)$$

Uwzględniając wysokość spadku poziomego medium L [m] po czasie t [s] oraz wielkość średnicy kolumny filtracyjnej D [m] oraz przewodu łączącego z naczyniem przelewowym d [m]:

$$L = h_0 - h_K \quad [\text{m}]; \quad a = 0,25 \cdot \pi \cdot d^2 \quad [\text{m}^2]; \quad A = 0,25 \cdot \pi \cdot D^2 \quad [\text{m}^2] \quad (8)$$

otrzymuje się równanie umożliwiające obliczanie współczynnika filtracji K [m/s] [13]:

$$K = - \frac{L_F}{t_K} \cdot \frac{d^2}{D^2} \cdot \text{Ln} \left(1 - \frac{L}{h_0} \right) \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (9)$$

gdzie:

- a – powierzchnia przekroju poprzecznego przewodu, $[\text{m}^2]$,
- A – powierzchnia przekroju poprzecznego kolumny filtracyjnej, $[\text{m}^2]$,
- d – średnica wewnętrzna przewodu, [m],
- D – średnica wewnętrzna kolumny filtracyjnej, [m],
- L_F – wysokość warstwy filtracyjnej, [m],
- t_K – czas infiltracji określonej ilości nadawy, [s],
- L – spadek poziomego medium po czasie t , [m],
- h_0 – odległość między górnym poziomem nadawy w kolumnie filtracyjnej i poziomem w naczyniu przelewowym w czasie $t=t_K$, [m].

Analiza wybranych parametrów kolmatacji w procesie filtracji grawitacyjnej

W trakcie serii badań obliczano współczynnik filtracji czystego złoża K_0 dla zagęszczenia $\beta_N=0 \text{ g/dm}^3$ oraz współczynnik filtracji złoża K_i po wprowadzeniu kolejnych porcji zawiesiny $V [\text{cm}^3]$ o zagęszczeniu $\beta_N=1000 \text{ g/dm}^3$. Na tej podstawie obliczono wartość współczynnika kolmatacji $\eta [-]$ z równania:

$$\eta = K_0 \cdot K_i^{-1} [-] \quad (10)$$

gdzie:

K_0 – współczynnik filtracji czystego złoża, [m/s],

K_i – współczynnik filtracji skolmatowanego złoża, [m/s].

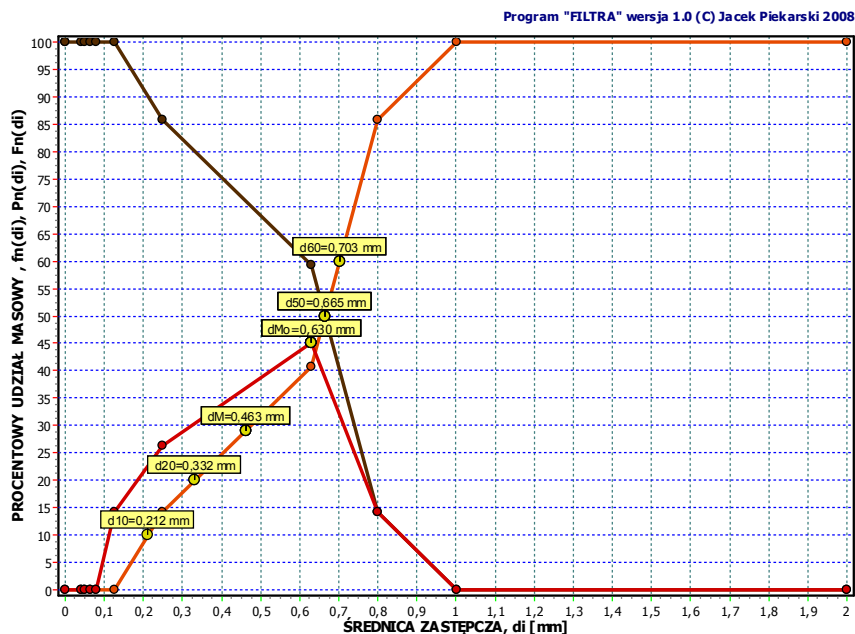
3. Wyniki badań

Złoże 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 w tabeli 1 oraz na wykresie 2.

Tabela 1. Wyniki analizy granulometrycznej złoża filtracyjnego

Table 1. Grain size ditribution of filtration bed

Lp.	Zakres średnic		Zawartość		Suma zawartości		
	d		frakcji		frakcji		
	min	max	q_i	γ_i	$\Phi_N(d_i)$		$F_N(d_i)$
	[mm]		[g]	[%]	[g]	[%]	[%]
1	0	40	0,12	0,008	0,12	0,008	100
2	40	50	0,16	0,011	0,28	0,019	99,992
3	50	63	0,17	0,012	0,45	0,031	99,981
4	63	80	0,33	0,022	0,78	0,053	99,969
5	80	125	0,36	0,024	1,14	0,077	99,947
6	125	250	210,13	14,218	211,27	14,295	99,923
7	250	630	390,34	26,411	601,61	40,706	85,705
8	630	800	667,01	45,132	1268,62	85,838	59,294
9	800	1000	208,83	14,130	1477,45	99,968	14,162
10	1000	2000	0,47	0,032	1477,92	100,000	0,032

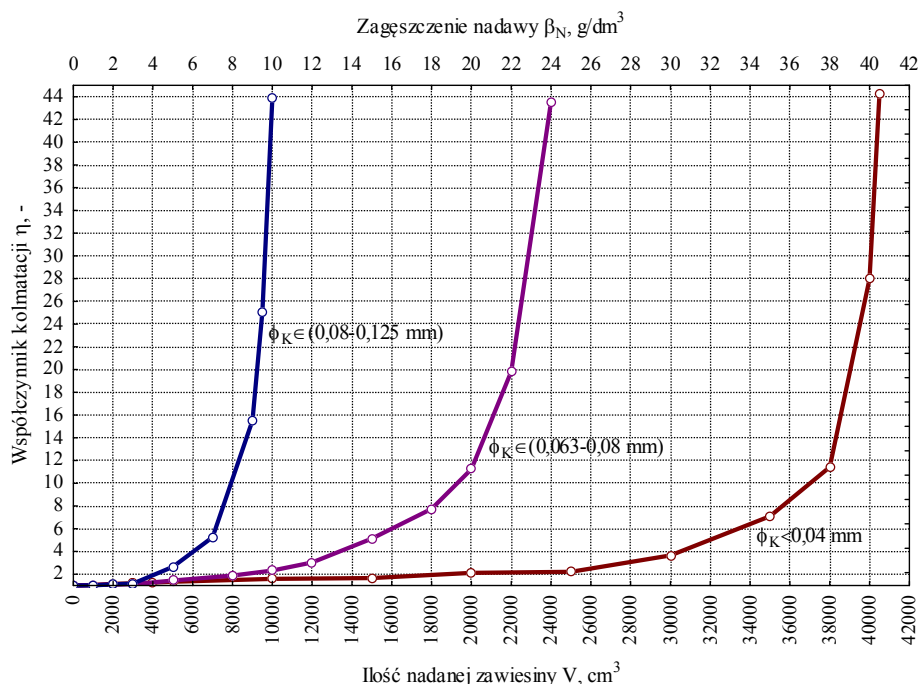


Rys. 2. Krzywa udziału masowego $f_N(d_i)$ oraz sumarycznego udziału masowego $F_N(d_i)$ i $\Phi_N(d_i)$ w zależności od wielkości średnicy zastępczej d_i [μm] z uwzględnieniem średnicy modalnej d_{M0} , medialnej d_{ME} , miarodajnej d_{10} , d_{20} , d_{60}

Fig. 2. Mass fraction $f_N(d_i)$ and total mass fraction $F_N(d_i)$ and $\Phi_N(d_i)$ curves depending on substitute diameter value d_i [μm] considering modal d_{M0} , medial d_{ME} , reliable d_{10} , d_{20} , d_{60} diameters

Na podstawie badań przedstawionych w tabeli 1 oraz na wykresie – rysunek 2, można stwierdzić, iż średnica modalna (tzw. dominanta) d_{M0} odpowiadająca maksimum krzywej udziału ilościowego $f_N(d_i)$ wynosi 630 μm . Obliczona średnica medialna (tzw. mediana) d_{ME} równa 50% udziału ilościowego wynosi 665 μm . Pozostałe wielkości charakterystyczne wynoszą odpowiednio $d_{10}=212$ μm , $d_{20}=332$ μm oraz $d_{60}=703$ μm . Na podstawie otrzymanych wielkości średnic obliczono przy pomocy równań matematycznych analityczno-empirycznych współczynniki filtracji K [m/s]. Współczynnik niejednorodności uziarnienia będący ilorzem charakterystycznych średnic ziaren d_{60} oraz d_{10} wynosi $U=3,31$ ($U \in <1 \div 5>$) oraz średnica d_{10} wynosząca 212 μm mieści się w zakresie stosowalności ($0,1 \text{ mm} < d_{10} < 3,0 \text{ mm}$) formuły Hazena do obliczania współczynnika filtracji, który dla temperatury zawiesiny nadanej do procesu

$T=21^{\circ}\text{C}$, wynosi $K_H=2,6\text{E-}4$ m/s. Na podstawie równania Seelheima współczynnik filtracji zależny od wartości średnicy medialnej d_{Me} i wynosi $K_S=2,10\text{E-}4$ m/s. Wg formuły USBSC tzw. amerykańskiej współczynnik filtracji wynika z wartości średnicy efektywnej d_{20} i wynosi $K_A=3,79\text{E-}4$ m/s. Natomiast wg formuły Krügera współczynnik filtracji wynosi $K_K=2,60\text{E-}4$ m/s. Tak więc wartości współczynnika filtracji obliczone na podstawie równań wg Hazena oraz Krügera w przybliżeniu odpowiadają wartości tego współczynnika, obliczonego na podstawie badań laboratoryjnych złoża nieskolmatowanego metodą zmiennego ciśnienia ($2,60\text{E-}4 \div 2,87\text{E-}4$ m/s).



Rys. 3. Wykres wpływu zmian ilości nadanej zawiesiny V [cm^3] oraz zagęszczenia nadawy β_N [g/dm^3] na wartość wskaźnika kolmatacji η [-] złoża filtracyjnego dla różnych frakcji fazy stałej kolmatanta ϕ_K [mm]

Fig. 3. Graph of influence of inflowing suspension volume V [cm^3] and solids concentration in inflowing suspension β_N [g/dm^3] on colmatation coefficient value η [-] of filtration bed for different fractions of solid phase of colmatant ϕ_K [mm]

W tabeli 2 przedstawiono wyniki badań wpływu zmiany czasu obniżania zwierciadła medium t [s] w kolumnie filtracyjnej oraz zagęszczenia fazy stałej w nadawie β_N [g/dm³] na wartość współczynnika filtracji K [m/s] i kolmatacji η [-] oraz wskaźnika zagęszczenia fazy stałej w filtracie β_F [mg/dm³] dla fazy stałej tworzącej kolmatację o wielkości $\phi_K < 0,04$ mm.

Tabela 2. Wyniki badań wpływu zmiany czasu obniżania zwierciadła medium t [s] w kolumnie filtracyjnej oraz zagęszczenia fazy stałej w nadawie β_N [g/dm³] na wartość współczynnika filtracji K [m/s] i kolmatacji η [-] oraz wskaźników zagęszczenia fazy stałej w filtracie β_F [mg/dm³] dla fazy stałej tworzącej kolmatację o frakcji $\phi_K < 0,04$ mm

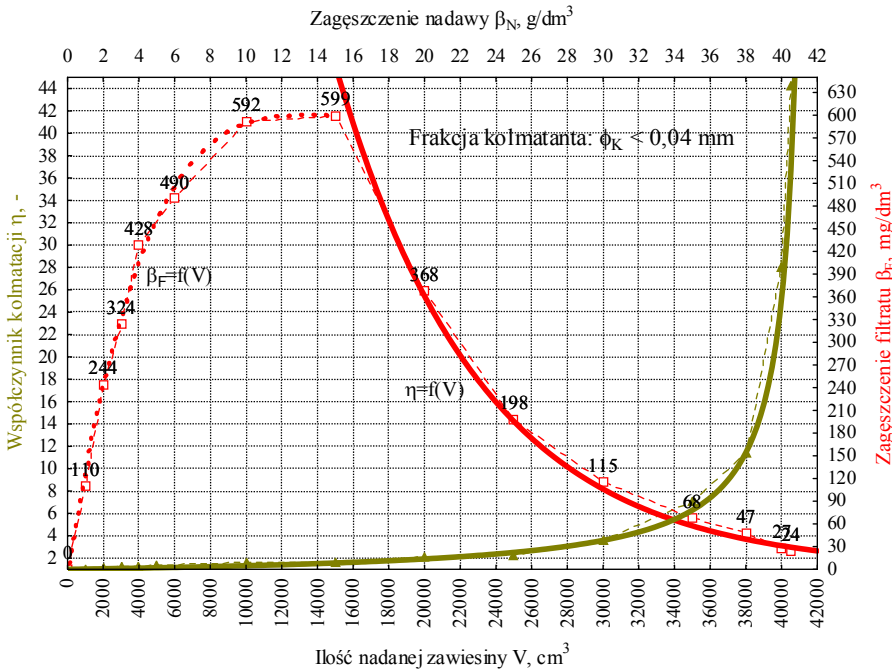
Table 2. Time of suspension level drop t [s] in filtration column and solids concentration in inflowing suspension β_N [g/dm³] on the value of filtration K [m/s] and colamatation η [-] coefficients and values of solids concentration in filtrate β_F [mg/dm³] for colmatant fraction $\phi_K < 0,04$ mm

Lp.	Ilość medium V	Czas obniżania t	Współczynnik		Zagęszczenie	
			filtracji K	kolmatacji η	nadawy β_N	filtratu β_F
	cm ³	s	m/s	-	g/dm ³	mg/dm ³
1	0*	53	260E-06	1,00	0	0
2	1000	56	246E-06	1,06	1	110
3	2000	61	226E-06	1,15	2	244
4	3000	64	215E-06	1,21	3	324
5	4000	67	205E-06	1,27	4	428
6	5000	71	194E-06	1,34	5	490
7	10000	84	164E-06	1,59	10	592
8	15000	88	156E-06	1,67	15	599
9	20000	112	123E-06	2,11	20	368
10	25000	117	118E-06	2,20	25	198
11	30000	193	71,3E-06	3,65	30	115
12	35000	376	36,6E-06	7,10	35	68
13	38000	605	22,7E-06	11,45	38	47
14	40000	1481	9,29E-06	27,99	40	27
15	40500	2340	5,88E-06	44,22	40,5	24

(*) – wartość odnosi się do złoża nieskolmatowanego

Do procesu filtracji grawitacyjnej wprowadzono porcjami – tabela 2, każdorazowo zawiesinę o zagęszczeniu $\beta_N = \text{const} = 1000$ g/dm³ w ilości całkowitej $V = 40,5$ dm³. Czas obniżania zwierciadła zawiesiny zmieniał się w zakresie

od 53 s (w przypadku czystego złoża) do 2340 s (dla złoża skolmatowanego). Obliczona na tej podstawie wartość współczynnika kolmatacji zmieniała się od $\eta=1$ do około $\eta=44$, przy której stwierdzono praktycznie całkowite zablokowanie przepływu na skutek zatrzymania fazy stałej z nadanej do procesu zawiesiny w złożu filtracyjnym.



Rys. 4. Wykres wpływu zmian ilości nadanej zawiesiny V [cm³] oraz zagęszczenia nadawy β_N [g/dm³] na wartość wskaźnika kolmatacji η [-] złoża filtracyjnego oraz zagęszczenia fazy stałej w filtracie β_F [mg/dm³] dla frakcji fazy stałej kolmatanta φ_K<0,04 mm

Fig. 4. Graph of influence of inflowing suspension volume V [cm³] and solids concentration in inflowing suspension β_N [g/dm³] on colmatation coefficient value η [-] of filtration bed and solids concentration in filtrate β_F [mg/dm³] for colmatant fraction φ_K<0,04 mm

Przebieg zmienności współczynnika kolmatacji η [-], w zależności od ilości nadanej zawiesiny V [cm³] w granicach od 0 do 40,5 dm³, opisuje równanie otrzymane w wyniku estymacji nieliniowej: $\eta=(1+1,64E-7 \cdot V)/(1-2,4E-5 \cdot V)$ – rysunek 3. W trakcie trwania procesu filtracji grawitacyjnej wartość wskaźnika zagęszczenia fazy stałej w filtracie β_F wzrosła maksymalnie do około

599 mg/dm³ dla V=15 dm³ nadanej zawiesiny. Stwierdzono również, w trakcie tej części badań, niewielki przyrost wartości współczynnika kolmatacji η od 1 do 1,6. Następnie w miarę wzrostu wartości współczynnika kolmatacji η w zakresie od 1,6 do około 44, wartość wskaźnika zagęszczenia fazy stałej w filtracji β_F [mg/dm³] uległa wykładniczo zmniejszeniu do około 24 mg/dm³ – rysunek 4. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, iż do wartości współczynnika kolmatacji około $\eta=1,6$, frakcja stała kolmatanta o uziarnieniu $\phi_K < 0,04$ mm została zatrzymana równomiernie, w całej objętości złoża filtracyjnego, co wynikało z dużej różnicy wielkości frakcji ziarnowej złoża filtracyjnego oraz frakcji kolmatującej – procentowy iloraz średniej wielkości fazy stałej frakcji kolmatującej oraz średnicy modalnej złoża filtracyjnego wynosi 2,82%.

Powyżej $\eta=1,6$ w złożu filtracyjnym, nastąpiło zmniejszenie porowatości międzyziarnowej, jak również w całej jego objętości, na różnej wysokości, powstały wyraźne blokujące przepływ, warstwy zatrzymanej fazy stałej kolmatanta – rysunek 7B, które spowodowały w dalszym etapie badań, wykładniczy wzrost wartości współczynnika kolmatacji η [-] oraz przyczyniły się do spadku wartości zagęszczenia fazy stałej w filtracji β_F [mg/dm³].

W tabeli 3 przedstawiono wyniki badań wpływu zmiany czasu obniżania zwierciadła medium t [s] w kolumnie filtracyjnej oraz zagęszczenia fazy stałej w nadawie β_N [g/dm³] na wartość współczynnika filtracji K [m/s] i kolmatacji η [-] oraz wskaźnika zagęszczenia fazy stałej w filtracji β_F [mg/dm³] dla fazy stałej tworzącej kolmatację o wielkości $\phi_K \in < 0,063 \div 0,08 >$ mm. Do procesu filtracji grawitacyjnej, analogicznie jak w przypadku $\phi_K < 0,04$ mm, porcjami wprowadzono – tabela 3, każdorazowo zawiesinę o zagęszczeniu $\beta_N = \text{const} = 1000$ g/dm³ w ilości całkowitej V=24 dm³. Czas obniżania zwierciadła zawiesiny zmieniał się w zakresie od 52 s (w przypadku czystego złoża) do 2286 s (dla złoża skolmatowanego). Obliczona na tej podstawie wartość współczynnika kolmatacji zmieniała się od $\eta=1$ do około $\eta=43,5$. Przebieg zmienności współczynnika kolmatacji η [-] w zależności od ilości nadanej zawiesiny V [cm³] w granicach od 0 do 24 dm³, opisuje równanie otrzymane w wyniku estymacji nieliniowej: $\eta = (1 + 0,574E-4 \cdot V) / (1 - 0,4E-4 \cdot V)$ – rysunek 3.

W trakcie trwania procesu filtracji grawitacyjnej wartość wskaźnika zagęszczenia fazy stałej w filtracji β_F [mg/dm³] wzrosła maksymalnie do około 295 mg/dm³ dla V=8 dm³ nadanej zawiesiny. W tej części badań stwierdzono niewielki przyrost wartości współczynnika kolmatacji η w zakresie od 1 do 1,88. Następnie w miarę wzrostu wartości współczynnika kolmatacji η od 1,88 do około 43,5, wartość wskaźnika zagęszczenia fazy stałej w filtracji β_F uległa wykładniczo zmniejszeniu do około 20 mg/dm³ – rysunek 5.

Tabela 3. Wyniki badań wpływu zmiany czasu obniżania zwierciadła medium t [s] w kolumnie filtracyjnej oraz zagęszczenia fazy stałej w nadawie β_N [g/dm^3] na wartość współczynnika filtracji K [m/s] i kolmatacji η [-] oraz wskaźników zagęszczenia fazy stałej w filtracie β_F [mg/dm^3] dla fazy stałej tworzącej kolmatację o frakcji $\varphi_K \in \langle 0,063 \div 0,08 \rangle$ mm

Table 2. Time of suspension level drop t [s] in filtration column and solids concentration in inflowing suspension β_N [g/dm^3] on the value of filtration K [m/s] and colmatation η [-] coefficients and values of solids concentration in filtrate β_F [mg/dm^3] for colmatant fraction $\varphi_K \in \langle 0,063 \div 0,08 \rangle$ mm

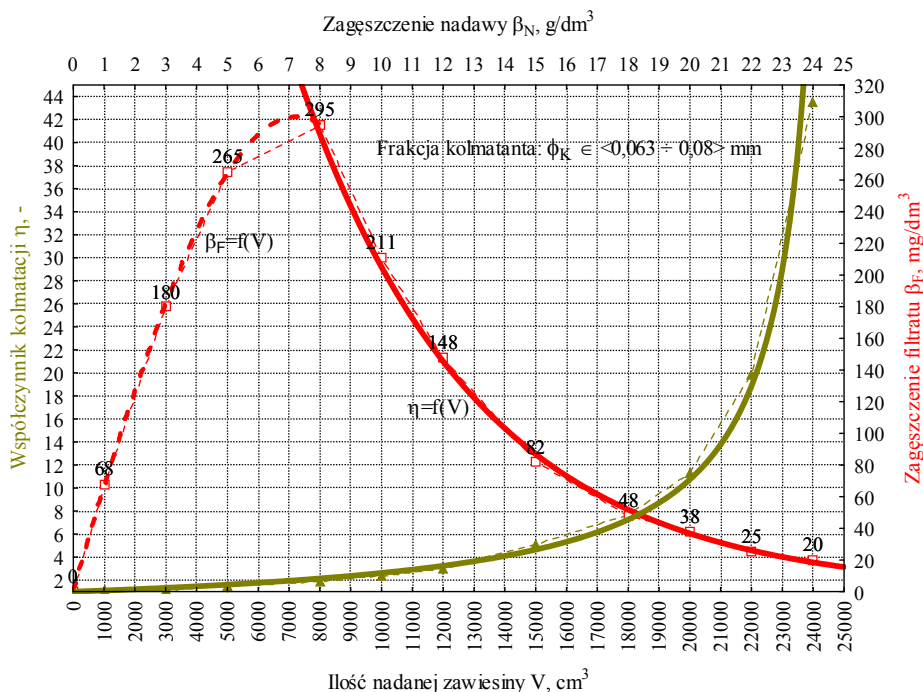
Lp.	Ilość medium	Czas obniżania	Współczynnik		Zagęszczenie	
	V		filtracji	kolmatacji	nadawy	filtratu
	cm^3	t	K	η	β_N	β_F
		s	m/s	–	g/dm^3	mg/dm^3
1	0	52	265E-06	1,00	0	0
2	1000	56	246E-06	1,07	1	68
3	3000	59	233E-06	1,12	2	180
4	5000	76	181E-06	1,45	5	265
5	8000	99	139E-06	1,88	8	295
6	10000	122	113E-06	2,32	10	211
7	12000	159	86,6E-06	3,03	12	148
8	15000	269	51,2E-06	5,12	15	82
9	18000	407	33,8E-06	7,75	18	48
10	20000	590	23,3E-06	11,24	20	38
11	22000	1042	13,2E-06	19,85	22	25
12	24000	2286	6,02E-06	43,52	24	20

(*) – wartość odnosi się do złoża nieskolmatowanego

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że do wartości współczynnika kolmatacji około $\eta=1,88$, frakcja stała kolmatanta o uziarnieniu $\varphi_K \in \langle 0,063 \div 0,08 \rangle$ mm koncentrowała się, podobnie jak w przypadku $\varphi_K < 0,04$ mm, w całej objętości złoża.

Najwięcej zatrzymanej fazy stałej zaobserwowano w górnej części złoża. Wynikało to z mniejszej, w stosunku do kolmatanta o uziarnieniu $\varphi_K < 0,04$ mm, różnicy wielkości frakcji ziarnowej złoża filtracyjnego oraz frakcji kolmatującej – procentowy iloraz średniej wielkości fazy stałej frakcji kolmatującej oraz średnicy modalnej złoża filtracyjnego wynosił 10,07%. Powyżej $\eta=1,88$ w złożu filtracyjnym, w górnej jego części powstała wyraźna, blokująca przepływ, warstwa zatrzymanej fazy stałej kolmatanta – rysunek 7C oraz 7E, powodująca wykładniczy wzrost wartości współczynnika kolmatacji

η [-] oraz przyczyniając się do spadku wartości zagęszczenia fazy stałej w filtracji β_F [mg/dm³] w miarę wzrostu ilości nadanej zawiesiny V [cm³].



Rys. 5. Wykres wpływu zmian ilości nadanej zawiesiny V [cm³] oraz zagęszczenia nadawy β_N [g/dm³] na wartość wskaźnika kolmatacji η [-] złoża filtracyjnego oraz zagęszczenia fazy stałej w filtracie β_F [mg/dm³] dla frakcji kolmatanta $\varphi \in <0,063 \div 0,08>$ mm

Fig. 5. Graph of influence of inflowing suspension volume V [cm³] and solids concentration in inflowing suspension β_N [g/dm³] on colmatation coefficient value η [-] of filtration bed and solids concentration in filtrate β_F [mg/dm³] for colmatant fraction $\varphi \in <0,063 \div 0,08>$ mm

W tabeli 4 przedstawiono wyniki badań wpływu zmiany czasu obniżania zwierciadła medium t [s] w kolumnie filtracyjnej oraz zagęszczenia fazy stałej w nadawie β_N [g/dm³] na wartość współczynnika filtracji K [m/s] i kolmatacji η [-] oraz wskaźnika zagęszczenia fazy stałej w filtracie β_F [mg/dm³] dla fazy stałej tworzącej kolmatację o wielkości $\varphi_K \in <0,08 \div 0,125>$ mm.

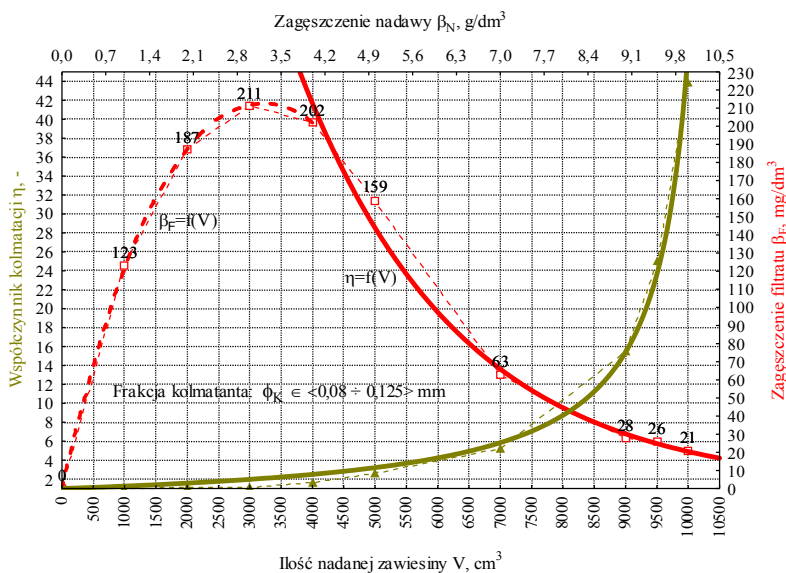
Tabela 4. Wyniki badań wpływu zmiany czasu obniżania zwierciadła medium t [s] w kolumnie filtracyjnej oraz zagęszczenia fazy stałej w nadawie β_N [g/dm³] na wartość współczynnika filtracji K [m/s] i kolmatacji η [-] oraz wskaźników zagęszczenia fazy stałej w filtracie β_F [mg/dm³] dla fazy stałej tworzącej kolmatację o frakcji $\varphi \in \langle 0,08; 0,125 \rangle$ mm

Table 2. Time of suspension level drop t [s] in filtration column and solids concentration in inflowing suspension β_N [g/dm³] on the value of filtration K [m/s] and colmatation η [-] coefficients and values of solids concentration in filtrate β_F [mg/dm³] for colmatant fraction $\varphi \in \langle 0,08; 0,125 \rangle$ mm

Lp.	Ilość medium	Czas obniżania	Współczynnik		Zagęszczenie	
	V		filtracji	kolmatacji	nadawy	filtratu
	cm ³	t	K	η	β_N	β_F
		s	m/s	–	g/dm ³	mg/dm ³
1	0	48	287E-06	1,00	0	0
2	1000	49	281E-06	1,01	1	123
3	2000	53	260E-06	1,09	2	187
4	3000	57	241E-06	1,18	3	211
5	4000	81	170E-06	1,67	4	202
6	5000	128	108E-06	2,63	5	159
7	7000	255	54,0E-06	5,26	7	63
8	9000	753	18,3E-06	15,52	9	28
9	9500	1217	11,3E-06	25,13	9,5	26
10	10000	2124	6,48E-06	43,83	10	21

(*) – wartość odnosi się do złoża nieskolmatowanego

Do procesu filtracji grawitacyjnej wprowadzono porcjami – tabela 4, każdorazowo zawiesinę o zagęszczeniu $\beta_N = \text{const} = 1000$ g/dm³ w ilości całkowitej $V = 10$ dm³. Czas obniżania zwierciadła zawiesiny zmieniał się w zakresie od 48 s (w przypadku czystego złoża) do 2124 s (dla złoża skolmatowanego). Obliczona na tej podstawie wartość współczynnika kolmatacji zmieniała się od $\eta = 1$ do około $\eta = 43,8$, przy której nastąpiło zablokowanie przepływu, na skutek zatrzymania fazy stałej z nadanej do procesu zawiesiny w złożu filtracyjnym. Przebieg zmienności współczynnika kolmatacji η [-] w zależności od ilości nadanej zawiesiny V [cm³], w granicach od 0 do 24 dm³, opisuje równanie otrzymane w wyniku estymacji nieliniowej: $\eta = (1 + 0,137E-3 \cdot V) / (1 - 0,95E-4 \cdot V)$ – rysunek 3. W trakcie trwania procesu filtracji grawitacyjnej wartość wskaźnika zagęszczenia fazy stałej w filtracie β_F wzrosła maksymalnie do około 211 mg/dm³ dla $V = 3$ dm³ nadanej zawiesiny.

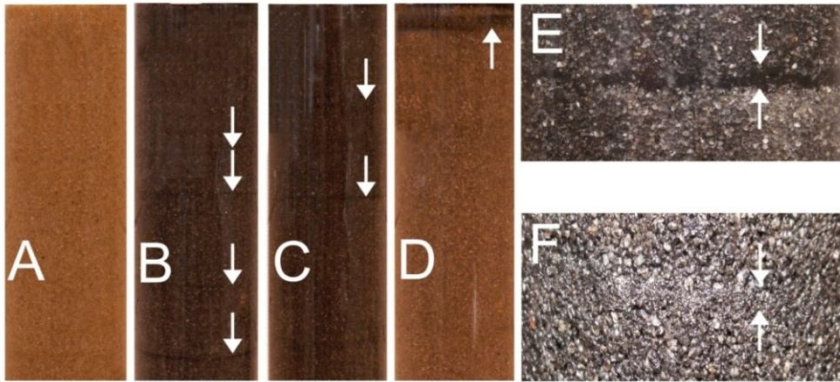


Rys. 6. Wykres wpływu zmian ilości nadanej zawiesiny V [cm^3] oraz zagęszczenia nadawy β_N [g/dm^3] na wartość wskaźnika kolmatacji η [-] złoża filtracyjnego oraz zagęszczenia fazy stałej w filtracie β_F [mg/dm^3] dla frakcji kolmatanta $\varphi \in \langle 0,08 \div 0,125 \rangle$ mm

Fig. 6. Graph of influence of inflowing suspension volume V [cm^3] and solids concentration in inflowing suspension β_N [g/dm^3] on colmatation coefficient value η [-] of filtration bed and solids concentration in filtrate β_F [mg/dm^3] for colmatant fraction $\varphi \in \langle 0,08 \div 0,125 \rangle$ mm

W trakcie tej części badań zaobserwowano niewielki przyrost wartości współczynnika kolmatacji η w zakresie od 1 do 1,17. Następnie w miarę wzrostu wartości współczynnika kolmatacji η od 1,17 do około 43,8 wartość wskaźnika zagęszczenia fazy stałej w filtracie β_F uległa wykładniczo zmniejszeniu do około $21 \text{ mg}/\text{dm}^3$ – rysunek 6. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że do wartości współczynnika kolmatacji około $\eta=1,17$, frakcja stała kolmatanta o uziarnieniu $\varphi_K \in \langle 0,08 \div 0,125 \rangle$ mm koncentrowała się najwięcej w górnej, przypowierzchniowej części złoża filtracyjnego, co wynikało tym razem z niewielkiej różnicy wielkości frakcji ziarnowej złoża filtracyjnego oraz frakcji kolmatującej. Procentowy iloraz średniej wielkości fazy stałej frakcji kolmatującej oraz średnicy modalnej złoża filtracyjnego wynosi 14,44%. Powyżej $\eta=1,17$ w złożu filtracyjnym, jedynie w górnej jego części, powstała blokująca przepływ warstwa zatrzymanej fazy stałej kolmatanta – rysunek 7D oraz 7F, powodując podobnie jak poprzednio, wykładniczy wzrost wartości współ-

czynnika kolmatacji η [-] oraz spadek wartości zagęszczenia fazy stałej w filtracji β_F [mg/dm³] w miarę wzrostu ilości nadanej zawiesiny V [cm³].



Rys. 7. Widok złoż filtracyjnych skolmatowanych różnymi frakcjami fazy stałej w nadanej zawieszynie oraz warstwy kolmatacji: A – złoż przed procesem filtracji; B – $\varphi_K < 0,04$ mm; C – $\varphi_K \in < 0,063 \div 0,08 >$ mm; D – $\varphi_K \in < 0,08 \div 0,125 >$ mm; E – widok warstwy kolmatanta, F – przekrój poprzeczny złoża filtracyjnego z uwzględnieniem warstwy kolmatanta

Rys. 7. Filtration beds colmatated with various fractions of solids in inflowing suspension and colmatation layer: A – bed before filtration; B – $\varphi_K < 0,04$ mm; C – $\varphi_K \in < 0,063 \div 0,08 >$ mm; D – $\varphi_K \in < 0,08 \div 0,125 >$ mm; E – colmatant layer, F – cross section of filtration bed with colmatant layer

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań zjawiska kolmatacji w procesie filtracji grawitacyjnej stwierdzono, iż zatrzymanie fazy stałej z nadanej zawiesiny zależy od wielkości jej uziarnienia. Frakcja najdrobniejsza ($\varphi_K < 0,04$ mm) kolmatanta migrowała, stopniowo zatrzymując się pomiędzy wolnymi przestrzeniami całej objętości złoża filtracyjnego. Po wprowadzeniu do procesu filtracji zawiesiny w ilości $V > 15$ dm³ (co odpowiadało $\eta > 1,67$), nastąpiło powstanie na różnej wysokości złoża kilku tzw. blokad kolmatacyjnych, które determinowały przepływ. Wykorzystana w badaniach średnia frakcja kolmatanta ($\varphi_K \in < 0,063 \div 0,08 >$ mm) zatrzymana została najwięcej, w górnej części złoża filtracyjnego. Powyżej $V = 8$ dm³ (co odpowiadało $\eta > 1,67$) zawiesiny skierowanej do procesu, powstała mniejsza ilość blokad kolmatacyjnych, które w tym przypadku charakteryzowały się większą grubością (około 0,5 cm). Największa frakcja kolmatanta ($\varphi_K \in < 0,08 \div 0,125 >$ mm) uległa zatrzymaniu, tworząc blokadę, w warstwie przypowierzchniowej złoża filtracyjnego – około 1 cm od powierzchni złoża.

Powstała w porach złoża blokada kolmatacyjna spowodowała obniżenie wartości współczynnika filtracji, a tym samym wzrost wartości współczynnika kolmatacji ($1 < \eta < 44$). Wartość wskaźnika zagęszczenia fazy stałej w filtracji wzrastała w zależności od ilości wprowadzonej zawiesiny oraz w odniesieniu do wartości współczynnika kolmatacji $\eta < 2$. Powyżej wartości ($\eta > 2$), w trakcie dalszego wprowadzania do procesu filtracji grawitacyjnej kolejnych porcji zawiesiny, zagęszczenie fazy stałej w filtracji uległo obniżeniu na skutek wzrostu ogólnej wielkości blokady kolmatacyjnej. Niezależnie od wielkości frakcji stałej tworzącej zawiesinę, przepływ medium przez złoże filtracyjne uległ zatrzymaniu przy wartości współczynnika kolmatacji około $\eta = 43 \div 44$.

Literatura

1. **Biedugnis S.:** *Metody informatyczne w wodociągach i kanalizacji*. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 1998.
2. **Hotłoś H., Kotowski A., Ciężak J.:** *Wpływ procesu kolmatacji i odkładania się osadów na wodochłonność basenów infiltracyjnych na przykładzie ujęć wodociągowych m. Wrocławia*. Ochrona Środowiska, PZITS nr 402, T.II, 1983.
3. **Ives K. J.:** *Deep Bed Filtration – Theory and Practise*. Filtration & Separation, 17, March-April, 1980.
4. **Kowal A.:** *Odnowa wody – podstawy teoretyczne procesów*. Podręcznik Politechniki Wrocławskiej, 1996.
5. **Palica M., Kocurek J.:** *Wybrane zagadnienia teorii filtracji i kompresji osadów*. Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2001.
6. **Piecuch T.:** *Studium teoretyczne procesu filtracji grawitacyjnej wraz z informacją o aktualnych problemach gospodarki wodnej i ściekowej*. Monografia Polskiego Towarzystwa Nauk o Ziemi, Częstochowa, 1984.
7. **Piekarski J.:** *Wybrane przykłady obliczeń komputerowych zastosowanych w inżynierii środowiska*. Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, 2004.
8. **Piekarski J.:** *Analiza geometryczna modelu procesu filtracji grawitacyjnej na różnych złożach przy zjawisku kolmatacji osadu*. Monografia Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, Vol. 11, 2005.
9. **Piekarski J.:** *Metody numeryczne w modelowaniu przebiegu procesu sorpcji*. Monografia, Wydawnictwo Komisji EKOSFEREY PAN, Szczecin, 2008.
10. **Rup K.:** *Procesy przenoszenia zanieczyszczeń w środowisku naturalnym*. Podręcznik WNT, 2006.
11. **Skolasińska K.:** *Efekty przepływu zawiesiny przez osady piaszczyste: eksperyment*. Sedimentologica, 2007.
12. **Zaradny H.:** *Matematyczne metody opisu i rozwiązań przepływu wody w nienasyconych i nasyconych gruntach i glebach*. Wydawnictwo Instytutu Budownictwa Wodnego, 23, 1990.
13. **Żurawski M., Skonieczny J., Koniecki A.:** *Współczynnik filtracji – zmodyfikowana metoda Kamińskiego*. Zeszyty Naukowe UAM, Poznań, 1971.

Analysis of Selected Parameters of Colmatation in the Process of Gravitational Filtration

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.

The aim of this research was to analyse influence of fraction of solids causing colmatation on the value of solids concentration in filtrate and value of filtration and colmatation coefficients during gravitational filtration on porous bed. Experiments were conducted with the use of the filtration deposit from Water Treatment Plant in Koszalin. Crumbled carbon was used as a solid fraction of filtrated suspension. Its colour was in clear contrast with grains of deposit which allowed visual observation of colmatation during gravitational filtration.

The investigations showed, that the smallest fraction of the suspension solid phase $\varphi_K < 0.04$ mm was stopped in the whole volume of the filtration bed. But when inflowing volume was greater several so-called colmatation blockades were created, limiting flow on different heights of the bed.

When medium fraction size of solids in the suspension $\varphi_K \in < 0.063 \div 0.08 >$ mm was investigated particles of suspension were uniformly stopped mainly in the upper part of the filtration bed. When the volume of suspension was bigger, less colmatation blockades were created but they were.

In the case of the biggest fraction size of solids in the suspension $\varphi_K \in < 0.08 \div 0.125 >$ mm, solid phase of suspension was stopped in the superficial layer of filtration bed (about 1 cm below surface of the bed).

Colmatation blockades arising in the porous bed caused decrease of filtration coefficient, and at the same time increase of colmatation coefficient ($1 < \eta < 44$).

