



Zastosowanie metod numerycznych do modelowania procesu filtracji grawitacyjnej

Jacek Piekarski
Politechnika Koszalińska

1. Wprowadzenie

Pojęcie komputerowego wspomaganie dotyczy między innymi aplikacji pozwalających na szybkie i dokładne wykonanie np. projektu. Funkcjonuje tu wiele specjalistycznych programów o skonkretyzowanych zastosowaniach, np.: program „JONIT” – projektowanie układów jonitowych, „POMPA” – projektowanie ssąco-tłoczących układów pompowych, „ATMO” – analiza rozprzestrzeniania stężeń zanieczyszczeń w atmosferze, „OSAD” – projektowanie rowów cyrkulacyjnych, czy też „SORP-LAB” – analiza procesu adsorpcji [9]. Pomimo różnego zastosowania czy przeznaczenia, aplikacje łączą funkcjonalność. Wariantowe rozwiązywanie danego zagadnienia wymaga wielokrotnego powtórzenia tych samych obliczeń dla różnych parametrów wejściowych. Tymczasem wykorzystanie programów komputerowych w zakresie np. projektowania układów jonitowych czy też adsorpcyjnych pozwala wykonać te same obliczenia przy znacznie mniejszym nakładzie pracy, krótszym czasie oraz większej niezawodności otrzymywanych wyników.

Filtracja grawitacyjna to proces technologiczny polegający na rozdzieleniu fazy stałej od ciekłej za pomocą przegród porowatych. Ścieki kierowane na złoża porowate są mieszaniną zawartych w fazie ciekłej zanieczyszczeń stałych. Zatrzymywanie zanieczyszczeń ze ścieków o charakterze mieszaniny polega na mechanicznym działaniu warstwy filtracyjnej, przez klinowanie w jej porach zanieczyszczeń stałych tj. kolmatację [2, 4, 5]. Proces kolmatacji jest zjawiskiem złożonym, w którym obok mechanicznego zatrzymania fazy stałej w złożu filtracyjnym, 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 [1]. Kolmatacja chemiczna wywołana jest osadzaniem się na ziarnach osadu w postaci węglanów wapnia i związków żelaza oraz innych substancji mineralnych nierozpuszczalnych w danych warunkach. Kolmatacja biologiczna wywołana jest zatrzymaniem w złożu bakterii, których aktywność może zwiększyć proces kolmatacji [8, 10]. W praktyce proces grawitacyjnego napływu ścieków na warstwę filtracyjną może zachodzić w różnych warunkach. Dotyczy to filtracji grawitacyjnej ścieków jednofazowych lub mieszaniny wody i zanieczyszczeń stałych przy zachowaniu stałego oraz zmiennego naporu masy ścieków na złożo. Ponadto w przypadku ścieków dwufazowych można wyróżnić dwa warianty takiego modelu procesu, tj. ze zjawiskiem kolmatacji, ale bez przyrostu warstwy osadu oraz ze zjawiskiem kolmatacji i z przyrostem warstwy osadu [6]. Ponadto w pewnych warunkach może wystąpić zjawisko blokowania przepływu przez złożo porowate (tworzące warstwę filtracyjną) na skutek powstawania tzw. blokad kolmatacyjnych (korków) na różnej wysokości złoża. Wynika to, między innymi, ze stosunku wielkości frakcji ziarnowej tworzącej warstwę filtracyjną do wielkości frakcji ziarnowej fazy stałej i jej zagęszczenia w zawieszinie skierowanej do procesu. Zasadnicza blokada przepływu, w wyniku zmniejszenia się porowatości złoża filtracyjnego, nie dotyczy całości złoża, lecz tylko jego fragmentu, czyli pewnej warstwy stanowiącej część złoża, która w znaczny sposób wstrzymuje przepływ (wartość współczynnika kolmatacji wynosi wówczas około 43÷44). W większości przypadków moment powstania w złożu filtracyjnym blokad kolmatacyjnych, charakteryzuje się punktem przegięcia wykresu funkcji parametru porowatości złoża w zależności od zmiany objęto-

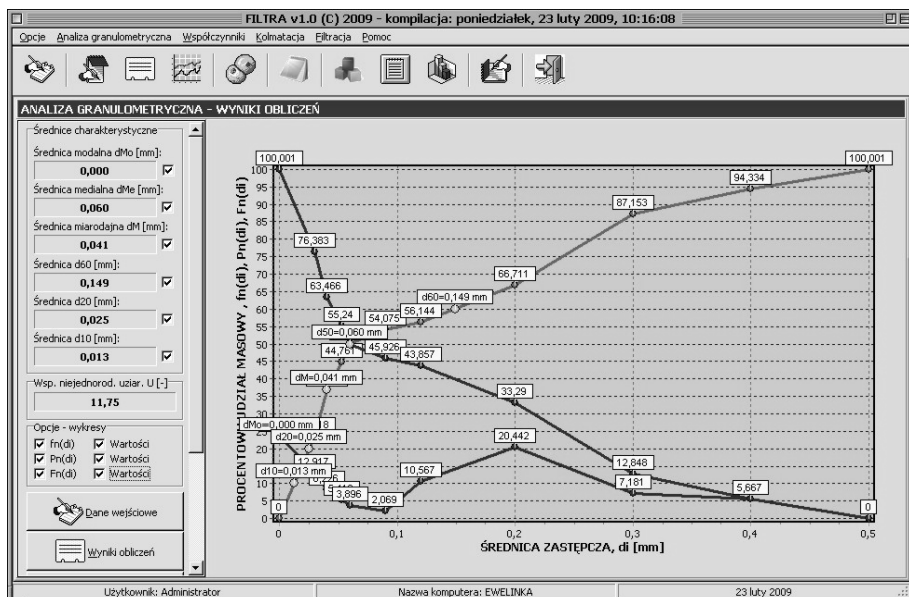
ści wprowadzonej zawiesiny. Ponadto w punkcie przegięcia przedstawionej zależności występuje ekstremum odnośnie wykresu funkcji wskaźnika zagęszczenia fazy stałej w filtracie w zależności od zmiany objętości wprowadzonej zawiesiny. Analiza wpływu poszczególnych parametrów na przebieg filtracji grawitacyjnej pozwala stwierdzić, że precyzyjny opis procesu jest bardzo trudny [1, 14]. Dlatego niezbędne są eksperymenty prowadzone w możliwie szerokim zakresie zmienności parametrów, by opis procesu był możliwie dokładny. Opis matematyczny procesu filtracji grawitacyjnej wymaga wyznaczenia szeregu parametrów charakterystycznych. Dotyczy to charakterystyki zastosowanej porowatej przegrody filtracyjnej, np. poprzez analizę granulometryczną oraz wyznaczenie średnic charakterystycznych, jak również charakterystyki przepływu medium przez złożo filtracyjne, np. poprzez obliczenie wartości współczynnika filtracji, przepuszczalności, kolmatacji, itd. [7, 11÷13].

W artykule przedstawiono autorski program komputerowy „FILTRA”, zrealizowany w środowisku DELPHI 2006, do modelowania procesu przepływu medium przez warstwę porowatą oraz procesu filtracji grawitacyjnej. Aplikacja składa się z szeregu modułów, będących oddzielnymi podprogramami. Pierwszy moduł odnosi się do analizy granulometrycznej i realizuje na podstawie danych wstępnych, obliczenia i wykres krzywej składu ziarnowego oraz średnic charakterystycznych, które w kolejnym kroku działania aplikacji, eksportowane są do kolejnego modułu, związanego z obliczeniami współczynnika filtracji oraz przepuszczalności. Natomiast wielkości obliczone w tym module, stanowią dane wstępne, w kolejnym module związanym z obliczeniami przepływu medium przez warstwę porowatą oraz procesem filtracji grawitacyjnej.

2. Charakterystyka aplikacji

Pierwszy moduł tzw. analizy granulometrycznej dotyczy charakterystyki materiału złoża filtracyjnego i realizuje obliczenia uziarnienia złoża filtracyjnego poprzez określenie w nim metodą sitową procentowej zawartości występujących w złożu frakcji. Analiza sitowa polega na określeniu składu granulometrycznego przez rozdzielanie poszczególnych frakcji w wyniku przesiania próbki złoża filtracyjnego na znormalizowanych sitach. Po wykonaniu badań analizy granulometrycznej do programu wprowadza się w postaci danych wstępnych, wymiar oczek

zastosowanych sit tj. średnicę minimalną d_{MIN} [mm], maksymalną d_{MAX} [mm] oraz masę pozostałości na sicie q_i [g]. Na tej podstawie aplikacja oblicza i wyprowadza zawartość frakcji G_i [%] oraz sumę zawartości frakcji w postaci ΣG_i [%] i $\Sigma G_i - G_i$ [%]. Wielkości te umożliwiają obliczenie średnic charakterystycznych. Przedstawiony na rysunku 1 moduł umożliwia wizualizację wyników obliczeń w postaci wykresu krzywej składu ziarnowego, z uwzględnieniem poszczególnych wartości zmiennych wynikowych, jak również średnic charakterystycznych tj.: d_{10} , d_{20} , d_{60} , d_M , d_{MO} oraz d_{ME} . Przedstawiony w programie wykres (rysunek 1) można na tym etapie realizacji algorytmu zapisać w formacie bitmapy (*.bmp) oraz Windows Metafile Format (*.wmf) i w ten sposób dołączyć do dowolnego dokumentu zewnętrznego. Ponadto program wyposażono w możliwość eksportu uzyskanych wyników do arkusza kalkulacyjnego (Microsoft Excel) poprzez wykorzystanie techniki OLE (Object Linking and Embedding). W tym celu, z poziomu aplikacji, uruchomiony zostaje odpowiednio sformatowany arkusz kalkulacyjny, do którego aplikacja „FILTRA” wprowadza wartości obliczeń.



Rys. 1. Moduł analizy granulometrycznej
Fig. 1. Module of granulometric analysis

Uzyskane w module „Analiza granulometryczna” wyniki obliczeń w postaci przedstawionych średnic charakterystycznych, w kolejnym kroku, eksportuje się do kolejnego modułu o nazwie „Współczynnik filtracji i przepuszczalności” (rysunek 2). Konstrukcja modułu zapewnia wprowadzanie danych wstępnych, wykonanie obliczeń oraz wyprowadzenie wyników. Ponadto moduł zawiera podprogram, którego zadaniem jest wizualizacja schematu stanowiska laboratoryjnego do realizacji obliczeń współczynnika filtracji metodą zmiennego ciśnienia. W części odpowiedzialnej za dane wstępne, wprowadza się jak to przedstawiono na rysunku 2, wysokość warstwy filtracyjnej L_F [mm], średnicę wewnętrzną kolumny filtracyjnej D [mm], średnicę wewnętrzną przewodu d [mm], wysokość spadku poziomego medium L [mm], różnicę wysokości między poziomem medium w kolumnie i naczyniu przelewowym h_0 [mm] oraz czas infiltracji określonej ilości medium t_k [s]. Program umożliwia edycję wartości, importowanych z modułu analizy granulometrycznej, średnic charakterystycznych tj.: d_{10} [mm], d_{20} [mm], d_{50} [mm] oraz d_{60} [mm]. W kolejnym kroku wprowadza się wartości: współczynnika kulistości ziarna złoża ψ [-], porowatości nieskolmatowanego złoża E_0 [-], współczynnika empiryczny zależnego od porowatości E_0 (w równaniu Hazena) CH [-], temperatury medium T [°C], gęstości fazy ciekłej g_C [kg/m³], gęstości fazy stałej g_S [kg/m³] oraz zagęszczenia zawiesiny B_N [kg/m³].

Po poprawnym wprowadzeniu wartości danych wstępnych, co kontroluje zewnętrzna procedura, program realizuje obliczenia i wyprowadza wyniki – rysunek 3. W pierwszym kroku aplikacja wyprowadza na podstawie temperatury T [°C] wartość poprawki temperaturowej CT [-]. Następnie w zależności od wartości średnic charakterystycznych d_{10} [mm] i d_{60} [mm] program oblicza wartości współczynnika nierównomierności uziarnienia U_H [-]. Na podstawie wartości początkowej porowatości złoża E_0 [-] oblicza wartość współczynnika empirycznego w równaniu Slichtera m_{SL} [-]. Natomiast wyprowadzona, w kolejnym kroku realizacji algorytmu, wartość średnicy ekwiwalentnej d_{ek} [mm] wynika z wartości średnicy d_{10} [mm] oraz współczynnika kulistości ziarna złoża ψ [-].

FILTRA v1.0 (C) 2009 - kompilacja: poniedziałek, 23 luty 2009, 13:21:34

Opcje Analiza granulometryczna Współczynniki Kolmatacja Filtracja Pomoc

DANE WSTĘPNE - WSPÓLCZYNNIK FILTRACJI I PRZEPUSZCZALNOŚCI

DANE WSTĘPNE - CHARAKTERYSTYKA ZŁOŻA FILTRACYJNEGO

1. Wysokość warstwy filtracyjnej	LF	[mm]	300
2. Średnica wewnętrzna kolumny filtracyjnej	D	[mm]	50
3. Średnica wewnętrzna przewodu	d	[mm]	16
4. Wysokość spadku poziomu medium po czasie tk	L	[mm]	130
5. Różnica wysokości między poziomem nadawy w kolumnie i naczyniu przelewowym	h0	[mm]	360
6. Czas infiltracji określonej ilości nadawy	tk	[s]	53
7. Średnica ziaren d10 (średnica efektywna ziaren)	d10	[mm]	0,212
8. Średnica ziaren d20	d20	[mm]	0,332
9. Średnica ziaren d50	d50	[mm]	0,665
10. Średnica ziaren d60	d60	[mm]	0,703

Analiza granulometryczna Schemat Wyniki obliczeń

Informacje
Eksport d10=0,212 mm; d20=0,332 mm; d50=0,665 mm; d60=0,703 mm wykonany poprawnie

Użytkownik: Administrator Nazwa komputera: EWELINKA 23 luty 2009

Rys. 2. Moduł „Współczynnik filtracji i przepuszczalności” – dane wstępne
 Fig. 2. Module “Filtration and permeability coefficient” – initial data

FILTRA v1.0 (C) 2009 - kompilacja: poniedziałek, 23 luty 2009, 13:21:34

Opcje Analiza granulometryczna Współczynniki Kolmatacja Filtracja Pomoc

WYNIKI OBLICZEŃ - WSPÓLCZYNNIK FILTRACJI I PRZEPUSZCZALNOŚCI

10. Współczynnik lepkości dynamicznej zawiesiny ($\mu_0=9,79E-004$ Ns/m²; $G=1,000$) miz [Ns/m²] 9,79E-004

WYNIKI OBLICZEŃ - Współczynnik filtracji

11. K ($t=53$ s; $LF=300$ mm; $D=50$ mm; $d=16$ mm; $h_0=360$ mm) K [m/s] 2,60E-004

12. Hazena ($d_{10}=0,212$ mm; $CH=376$; $T=21^\circ\text{C}$) Oblicz CH [-] KH [m/s] 2,60E-004

13. Krugera ($d_{10}=0,212$ mm; $E_0=0,4084$; $T=21^\circ\text{C}$) (Symulacja) Oblicz E0 [-] KK [m/s] 2,60E-004

14. Seelheima ($d_{50}=0,665$ mm; $T=21^\circ\text{C}$) Oblicz d50 [mm] KSH [m/s] 2,10E-004

15. Slichtera ($d_{10}=0,212$ mm; $E_0=0,4084$; $\mu_0=9,79E-004$; $T=21^\circ\text{C}$) Oblicz E0 [-] KSL [m/s] 2,52E-004

16. USBSC (tzw. amerykańska) ($d_{20}=0,332$ mm; $T=21^\circ\text{C}$) Oblicz d20 [mm] KUSBSC [m/s] 3,79E-004

WYNIKI OBLICZEŃ - Współczynnik przepuszczalności

Dla $K=2,60E-004$ m/s; $gz=998,01$ kg/m³ oraz $miz=9,79E-004$ Ns/m² k [m²] 2,60E-011

Wg Kozeny-Carmana ($E_0=0,41$; $de=0,212$ mm oraz $wk=0,6291$) Oblicz wk [-] kC [m²] 2,60E-011

Dane wejściowe Współczynnik korygujący Cr wg Wzrost Eksport Analiza danych Kolmatacja Eksport

Informacje
- Wg Hazena: dla $K=2,60E-004$ m/s obliczony współczynnik $CH=376$
 - Wg Krugera: dla $K=2,60E-004$ m/s oraz $d_{10}=0,212$ mm obliczona porowatość wynosi $E_0=0,4084$
 - Dla $k=3,07E-011$ m/s współczynnik kulistości $psi=0,5800$ stąd po korekcie dla $k=2,60E-011$ m/s współczynnik kulistości $psi=0,6291$

Użytkownik: Administrator Nazwa komputera: EWELINKA 23 luty 2009

Rys. 3. Moduł „Współczynnik filtracji i przepuszczalności” – wyniki obliczeń
 Fig. 3. Module “Filtration and permeability coefficient” – results of calculations

Na podstawie obliczonej wartości średnicy ekwiwalentnej dek [mm] oraz początkowej porowatości złoża E_0 [-] program oblicza średnicę zastępczą d_z [mm] i następnie na podstawie wartości gęstości fazy stałej g_s [kg/m³] oraz zagęszczenia zawiesiny B_n [kg/m³] aplikacja oblicza wartość koncentracji fazy stałej k_{fs} [-]. Natomiast wyprowadzona wartość gęstości zawiesiny g_z [kg/m³] wynika z wartości gęstości fazy ciekłej g_c [kg/m³], gęstości fazy stałej g_s [kg/m³] oraz zagęszczenia zawiesiny B_n [kg/m³]. Współczynnik lepkości dynamicznej fazy ciekłej μ_{i0} [N·s/m²] aplikacja oblicza na podstawie temperatury medium T [°C]. Natomiast wartość współczynnika korygującego C_R [-] współczynnik lepkości dynamicznej zawiesiny μ_{iZ} [N·s/m²] program oblicza na podstawie wartości koncentracji fazy stałej k_{fs} [-] wykorzystując wybrane empiryczne formuły np. wg Einsteina, Vanda, Hatscheka, Thomasa lub Happela. Na tej podstawie, w kolejnym kroku, aplikacja wyprowadza wartość współczynnika lepkości dynamicznej zawiesiny μ_{iZ} [N·s/m²] będącego iloczynem wartości współczynnika lepkości dynamicznej fazy ciekłej μ_{i0} [N·s/m²] oraz współczynnika korygującego C_R [-]. W następnym etapie obliczeń w tym module, program wyprowadza wartość współczynnika filtracji K [m/s] wyznaczoną laboratoryjnie metodą zmiennego ciśnienia oraz wyprowadza wartość współczynnika filtracji K [m/s] obliczoną na podstawie równań empirycznych – Hazena, Krügera, Seelheima, Slichtera oraz USBSC. Finalnie moduł ten na podstawie wartości współczynnika filtracji K [m/s] wyznaczonego metodą zmiennego ciśnienia oraz wartości współczynnika lepkości dynamicznej zawiesiny μ_{iZ} [N·s/m²] i gęstości zawiesiny g_z [kg/m³] oblicza wartość współczynnika przepuszczalności k [m²] oraz kontrolnie na podstawie porowatości złoża E_0 [-] i średnicy zastępczej d_z [mm] oblicza wartość współczynnika przepuszczalności k_C [m²] na podstawie formuły Kozeny-Carmana.

Dodatkowym elementem modułu „Współczynnik filtracji i przepuszczalności” jest możliwość symulacji w trybie rzeczywistym, zmiany wartości współczynnika empirycznego CH [-] w zależności od zmiany wartości porowatości E_0 [-] na podstawie równania Hazena. Istnieje również możliwość symulacji zmiany wartości porowatości E_0 [-] w zależności od zmiany wartości średnicy uziarnienia d_{10} [mm] na podstawie równania Krügera. Aplikacja umożliwia również, na podstawie równania Slichtera, symulację zmiany wartości porowatości E_0 [-] w zależności od

zmiany wartości średnicy uziarnienia d_{10} [mm], zachowując stałe wartości współczynnika lepkości fazy ciekłej μ_{i0} [$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$] oraz współczynnika empirycznego m_{SL} [-]. Ponadto program „FILTRA” na podstawie równania USBSC wykonuje także symulację zmiany wartości współczynnika filtracji K [m/s] w zależności od zmiany wartości średnicy uziarnienia d_{20} [mm].

Kolejny zewnętrzny podprogram zawiera moduł „Kolmatacja”, który umożliwia wizualizację zmian wartości współczynnika filtracji K [m/s], przepuszczalności k [m^2], porowatości skolmatowanego złoża E_S [-] oraz współczynnika kolmatacji n [-] w zależności od zmiany czasu obniżania zwierciadła medium t_S [s] w badaniach współczynnika filtracji K [m/s] metodą zmiennego ciśnienia. W trakcie inicjalizacji modułu pobierana jest wartość czasu obniżania zwierciadła medium t_0 [s] w złożu nieskolmatowanym, wynikająca z danych wstępnych, wprowadzonych w module „Współczynnik filtracji i przepuszczalności”. Następnie na tej podstawie obliczane są wartości porowatości E_S [-], współczynnika filtracji K [m/s] oraz przepuszczalności k [m^2]. Parametrem zmiennym niezależnym jest czas obniżania zwierciadła medium t [s] w złożu, w którym wystąpiła kolmatacja. Moduł umożliwia przedstawienie osi w skali dziesiętnej lub logarytmicznej. Ponadto istnieje możliwość zapisu otrzymanego wykresu do pliku w formacie bitmapy (*.bmp) lub formacie Windows Metafile Format (*.wmf).

Wartości parametrów obliczone w module „Analiza granulometryczna” oraz module „Współczynnik filtracji oraz przepuszczalności” importowane są do kolejnego modułu „Przepływ medium przez warstwę porowatą” – rysunek 4. W celu charakterystyki przepływu przez warstwę porowatą do programu „FILTRA” wprowadza się wartości następujących parametrów zmiennych niezależnych: wysokość warstwy filtracyjnej L_F [cm], średnicę złoża D_Z [cm], różnicę wysokości H_C [cm], stałą siatki t_p [m^{-1}], współczynnik lepkości dynamicznej fazy ciekłej μ_{i0} [$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$], współczynnik filtracji K [m/s] oraz współczynnik przepuszczalności k [m/s]. Po prawidłowym wprowadzeniu danych wstępnych, moduł w trybie rzeczywistym oblicza i wyprowadza wyniki. Na podstawie średnicy złoża D_Z [cm] oblicza jego powierzchnię A_Z [m^2]. Różnicę ciśnień P_Z [Pa] oblicza na podstawie różnicy wysokości H_C [cm] oraz gęstości fazy ciekłej g_C [kg/m^3]. W kolejnym kroku oblicza opór ogólny siatki filtracyjnej R_{OS} [$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^5$]. Następnie na podstawie wysokości

złoża L_F [cm] oraz wartości współczynnika przepuszczalności k [m^2] aplikacja oblicza opór średni złoża filtracyjnego R_{SZ} [m^{-1}]. Natomiast w zależności od wartości współczynnika lepkości dynamicznej fazy ciekłej μ_0 [$N \cdot s/m^2$] i współczynnika przepuszczalności k [m^2] oblicza opór właściwy złoża filtracyjnego R_{WZ} [$N \cdot s/m^4$]. Na jego podstawie oraz uwzględniając wielkość powierzchni A_Z [m^2] i wysokość złoża L_F [cm] oblicza opór ogólny złoża filtracyjnego R_{OZ} [$N \cdot s/m^5$]. Następnie program oblicza i wyprowadza sumę rozpatrywanych oporów ogólnych R [$N \cdot s/m^5$]. Podsumowując aplikacja oblicza wydatek objętościowy przepływu q_V [m^3/s] oraz prędkość przepływu v_P [m/s].

PRZEPLYW MEDIUM PRZEZ WARSTWE POROWATA PRZY STALYM CIŚNIENIU			
08. Opór właściwy złoża filtracyjnego ($\mu_0=9,79E-004$ Ns/m ² ; $k_0=2,60E-011$ m ²)	Rwz	[Ns/m ⁴]	3,77E+007
09. Opór ogólny złoża filtracyjnego (Rwz=3,77E+007 Ns/m ⁴ ; A=1,96E-003 m ² ; LF=30,00 cm)	Roz	[Ns/m ⁵]	5,75E+009
10. Suma oporów ogólnych złoża filtracyjnego i siatki (Roz=5,75E+009 Ns/m ⁵ ; Ros=0,00E+000 Ns/m ⁵)	R	[Ns/m ⁵]	5,75E+009
11. Prędkość przepływu ($q_V=6,805E-007$ m ³ /s; A=1,96E-003 m ²)	vp	[m/s]	3,47E-004
12. Wydatek objętościowy przepływu (Pz=3,92E+003 N/m ² ; R=5,75E+009 Ns/m ⁵)	qv	[m ³ /s]	6,81E-007
SPRAWDZENIE (WG KOZENY-GARMANA)			
13. Opór średni złoża filtracyjnego (LF=30,00 cm; $k_C=2,60E-011$ m ²)	RszC	[1/m]	1,15E+010
14. Opór właściwy złoża filtracyjnego ($\mu_0=9,79E-004$ Ns/m ² ; $k_C=2,60E-011$ m ²)	RwzC	[Ns/m ⁴]	3,76E+007
15. Opór ogólny złoża filtracyjnego (RwzC=3,76E+007 Ns/m ⁴ ; A=1,96E-003 m ² ; LF=30,00 cm)	RozC	[Ns/m ⁵]	5,75E+009
16. Suma oporów ogólnych złoża filtracyjnego i siatki (RozC=5,75E+009 Ns/m ⁵ ; Ros=0,00E+000 Ns/m ⁵)	RC	[Ns/m ⁵]	5,75E+009
17. Wydatek objętościowy przepływu (Pz=3,92E+003 N/m ² ; RC=5,75E+009 Ns/m ⁵)	qv	[m ³ /s]	6,81E-007

Informacje
Eksport: Współczynnik lepkości fazy ciekłej $\mu_0=9,79E-004$ Ns/m²; gęstość fazy ciekłej $\rho_0=998,01$ kg/m³; współczynnik filtracji $k_0=2,60E-004$ m/s

Uzytkownik: Administrator Nazwa komputera: EWELINKA 25 Luty 2009

Rys. 4. Moduł „Przepływ medium przez warstwę porowatą” – wyniki obliczeń
Fig. 4. Module “Medium flow through a porous layer” – results of calculations

W celu kontroli poprawności obliczeń, program wyprowadza wartości oporu średniego R_{SZ} [m^{-1}], właściwego R_{WZ} [$N \cdot s/m^4$] oraz ogólnego złoża R_{OZ} [$N \cdot s/m^5$], jak również sumę rozpatrywanych oporów ogólnych R [$N \cdot s/m^5$] oraz wydatek objętościowy q_V [m^3/s] i prędkość przepływu v_P [m/s] uwzględniając w obliczeniach wartość współczynnika przepuszczalności k_C [m/s] wyznaczoną na podstawie równa-

nia Kozeny-Carmana. Ponadto moduł „Przepływ medium przez warstwę porowatą” umożliwia obserwację zmiany w trybie rzeczywistym wartości parametrów zmiennych wynikowych przedstawionych w zależności od zmiany wybranych parametrów zmiennych niezależnych tj.: wysokości L_F [cm] i średnicy złoża D_Z [cm] oraz różnicy wysokości H_C [cm].

Wartości obliczone w module „Analiza granulometryczna” i module „Współczynnik filtracji oraz przepuszczalności” oraz „Przepływ medium przez warstwę porowatą” w dalszej kolejności realizacji algorytmu, eksportowane są do kolejnego modułu „Proces filtracji przez warstwę porowatą przy stałym ciśnieniu” – rysunek 5. Na tym etapie realizacji algorytmu, wprowadzanymi parametrami zmiennymi niezależnymi charakteryzującymi złożo filtracyjne są: wysokość warstwy filtracyjnej L_F [cm], średnica złoża D_Z [cm], różnica wysokości H_C [cm], porowatość nieskolmatowanego złoża E_0 [-], współczynnik filtracji K [m/s]. Natomiast przepływające przez złożo filtracyjne medium opisują następujące parametry zmienne niezależne: temperatura T [°C], gęstość fazy ciekłej g_C [kg/m³], gęstość fazy stałej g_S [kg/m³], zagęszczenie fazy stałej w nadawie B_N [mg/dm³], objętość nadawy V_N [dm³] oraz zagęszczenie fazy stałej w filtracie B_F [mg/dm³]. Ponadto wprowadza się wartość współczynnika kolmatacji WKLzb [-] oraz wysokość powstałej blokady kolmatacyjnej L_{KL} [mm] – rysunek 5.

Po prawidłowym wprowadzeniu danych wstępnych, program oblicza i wyprowadza wyniki w trybie rzeczywistym. Na podstawie średnicy złoża D_Z [cm] oblicza jego powierzchnię A_Z [m²]. Natomiast na podstawie wartości zagęszczenia fazy stałej w nadawie B_N [mg/dm³], gęstości fazy ciekłej g_C [kg/m³] oraz stałej g_S [kg/m³] aplikacja oblicza gęstość zawiesiny g_Z [kg/m³]. Wartość współczynnika lepkości dynamicznej zawiesiny m_{iZ} [N·s/m²] wynika z iloczynu wartości współczynnika lepkości dynamicznej fazy ciekłej m_{i0} [N·s/m²] oraz współczynnika korygującego C_R [-].

Wartość współczynnika przepuszczalności złoża k [m²] program oblicza na podstawie wprowadzonej wartości współczynnika filtracji K [m/s] oraz obliczonej wartości gęstości zawiesiny g_Z [kg/m³] i współczynnika lepkości dynamicznej zawiesiny m_{iZ} [N·s/m²]. Masę fazy stałej w nadawie Q_{SN} [g] oblicza z ilorazu zagęszczenia fazy stałej w nadawie B_N [mg/dm³] i objętości nadawy V_N [dm³], natomiast objętość

fazy stałej w nadawie V_{SN} [cm³] wyprowadza na podstawie wartości obliczonej masy fazy stałej w nadawie Q_{SN} [g] i gęstości fazy stałej g_S [kg/m³]. W algorytmie programu, w uproszczeniu założono, że objętość fazy ciekłej w nadawie V_{CN} [dm³] jest taka sama, jak objętość fazy ciekłej w filtracji V_{CF} [dm³], dlatego w kolejnym kroku, uwzględniając również wprowadzoną wartości zagęszczenia fazy stałej w filtracji B_F [mg/dm³] oraz gęstość fazy stałej g_S [kg/m³], aplikacja oblicza i wyprowadza wartość masy fazy stałej w filtracji Q_{SF} [g] oraz objętość fazy stałej w filtracji V_{SF} [cm³]. W kolejnym etapie obliczeń, program na podstawie wprowadzonych wartości porowatości złoża nieskolmatowanego E_0 [-] oraz współczynnika kolmatacji $WKLz_b$ [-], wyprowadza wartość porowatości złoża skolmatowanego E_{z_b} [-]. Natomiast na podstawie wartości gęstości fazy stałej g_S [kg/m³], powierzchni złoża A_Z [m²], wysokości powstałej blokady kolmatacyjnej L_{KL} [mm] oraz porowatości złoża skolmatowanego E_Z [-] aplikacja oblicza masę fazy stałej zatrzymaną w powstałej blokadzie kolmatacyjnej Q_{SB} [g].

PROCES FILTRACJI PRZEZ WARSTWĘ POROWATĄ PRZY STAŁYM CIŚNIENIU			
17. Porowatość blokady kolmatacyjnej (E0=0,41; Ez=0,41; Ezb=0,41)	Eb	[-]	0,41
18. Współczynnik kolmatacji blokady (E0=0,41; Eb=0,41)	Wkb	[-]	1,00
WYNIKI OBLICZEŃ - SKOLMATOWANE ZŁOŻE			
19. Porowatość złoża z blokadą kolmatacyjną (E0=0,41; WKLzb=1,00)	Ezb	[-]	0,41
20. Współczynnik filtracji (kz0=2,60E-004 m/s; WKLzb=1,00)	Kz	[m/s]	2,60E-004
21. Współczynnik przepuszczalności (kz0=2,60E-011 m2; WKLzb=1,00)	kz	[m2]	2,60E-011
22. Opór właściwy (WKLzb=1,00; miz=9,79E-004 Ns/m2; kz=2,60E-011 m2)	Rwzb	[Ns/m4]	3,77E+007
23. Opór średni (WKLzb=1,00; LF=30 mm; kz=2,60E-011 m2)	Rszb	[1/m]	1,15E+010
24. Opór ogólny (Rwzb=3,77E+007 Ns/m4; A=1,96E-003 m2; LF=30,00 cm)	Rozb	[Ns/m5]	5,75E+009
25. Prędkość przepływu (qv=6,805E-007 m3/s; A=1,96E-003 m2)	vp	[m/s]	3,47E-004
26. Wydatek objętościowy przepływu (Pz=3,92E+003 N/m2; Rozb=5,75E+009 Ns/m5)	qv	[m3/s]	6,81E-007

Informacje
 Eksport z modułu - "Przepływ przez warstwę porowatą"; Wysokość złoża LF=30 cm; średnica złoża Dz= 5 cm; różnica wysokości Hc=10,00 cm; porowatość złoża E0=0,41; współczynnik filtracji kz0=2,60E-004 m/s; temperatura medium Tz=21,00°C; gęstość fazy ciekłej gc=998,01 kg/m3

Użytkownik: Administrator Nazwa komputera: EWELINKA 25 Luty 2009

Rys. 5. Moduł „Proces filtracji przez warstwę porowatą przy stałym ciśnieniu” – wyniki obliczeń

Fig. 5. Module “Filtration process through porous layer at constant pressure” – results of calculations

W dalszej kolejności realizacji algorytmu, z różnicy masy fazy stałej znajdującej się w nadawie Q_{SN} [g] oraz masy fazy stałej zatrzymanej w blokadzie kolmatacyjnej Q_{SB} [g] i masy fazy stałej w filtracji Q_{SF} [g] oblicza masę fazy stałej Q_{SZ} [g] oraz objętość fazy stałej V_{SZ} [cm³] znajdującą się w porach złoża filtracyjnego. Następnie na podstawie wartości porowatości złoża nieskolmatowanego E_0 [-] i skolmatowanego E_{ZB} [-], wysokości złoża L_Z [cm], wysokości blokady kolmatacyjnej L_{KL} [mm], masy fazy stałej w nadawie Q_{SN} [g], masy fazy stałej w filtracji Q_{SF} [g] oraz gęstości fazy stałej g_S [kg/m³] oblicza porowatość złoża E_Z [-] oraz współczynnik kolmatacji złoża $WKLZ$ [-]. W kolejnym kroku wyprowadza charakterystykę powstałej blokady kolmatacyjnej. Na podstawie ilorazu masy fazy stałej będącej w blokadzie kolmatacyjnej Q_{SB} [g] oraz gęstości fazy stałej g_S [kg/m³] oblicza objętość fazy stałej w blokadzie V_{SB} [cm³] oraz porowatość E_B [-] i współczynnik kolmatacji blokady WKB [-].

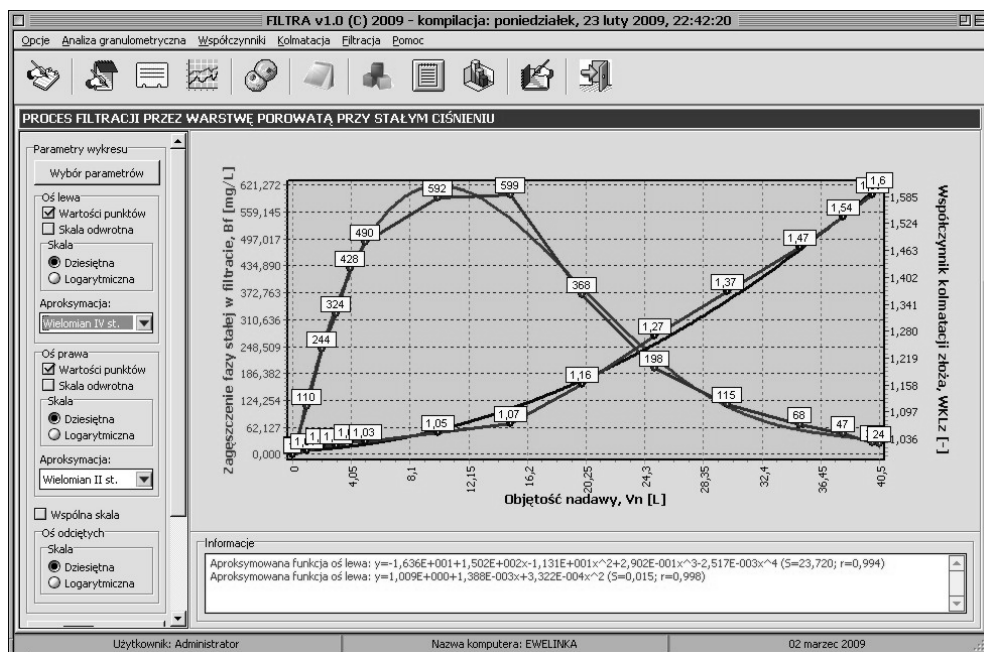
LF	Dz	Hc	ED	KO	Tz	gc	gs	Vn	Bn	Bf	WKLzb	LKL	Az	gz	miz	Pz	Izo0	Qsn	V
30,00	5,00	10,00	0,42	2,60E-004	21,00	998,01	1300,00	0,00	1000,00	0,00	1,00	0,00	1,96E-003	998,24	3,81E-004	92E+002	61E-011	0,00	0
30,00	5,00	10,00	0,42	2,60E-004	21,00	998,01	1300,00	1,00	1000,00	110,00	1,06	0,00	1,96E-003	998,24	3,81E-004	92E+002	61E-011	1,00	0
30,00	5,00	10,00	0,42	2,60E-004	21,00	998,01	1300,00	2,00	1000,00	244,00	1,15	0,00	1,96E-003	998,24	3,81E-004	92E+002	61E-011	2,00	1
30,00	5,00	10,00	0,42	2,60E-004	21,00	998,01	1300,00	3,00	1000,00	324,00	1,21	0,00	1,96E-003	998,24	3,81E-004	92E+002	61E-011	3,00	2
30,00	5,00	10,00	0,42	2,60E-004	21,00	998,01	1300,00	4,00	1000,00	428,00	1,27	0,00	1,96E-003	998,24	3,81E-004	92E+002	61E-011	4,00	3
30,00	5,00	10,00	0,42	2,60E-004	21,00	998,01	1300,00	5,00	1000,00	490,00	1,34	0,10	1,96E-003	998,24	3,81E-004	92E+002	61E-011	5,00	3
30,00	5,00	10,00	0,42	2,60E-004	21,00	998,01	1300,00	10,00	1000,00	592,00	1,59	0,10	1,96E-003	998,24	3,81E-004	92E+002	61E-011	10,00	7
30,00	5,00	10,00	0,42	2,60E-004	21,00	998,01	1300,00	15,00	1000,00	599,00	1,67	0,14	1,96E-003	998,24	3,81E-004	92E+002	61E-011	15,00	11
30,00	5,00	10,00	0,42	2,60E-004	21,00	998,01	1300,00	20,00	1000,00	368,00	2,11	0,17	1,96E-003	998,24	3,81E-004	92E+002	61E-011	20,00	15
30,00	5,00	10,00	0,42	2,60E-004	21,00	998,01	1300,00	25,00	1000,00	198,00	2,20	1,00	1,96E-003	998,24	3,81E-004	92E+002	61E-011	25,00	19
30,00	5,00	10,00	0,42	2,60E-004	21,00	998,01	1300,00	30,00	1000,00	115,00	3,65	1,10	1,96E-003	998,24	3,81E-004	92E+002	61E-011	30,00	23
30,00	5,00	10,00	0,42	2,60E-004	21,00	998,01	1300,00	35,00	1000,00	68,00	7,10	1,10	1,96E-003	998,24	3,81E-004	92E+002	61E-011	35,00	26
30,00	5,00	10,00	0,42	2,60E-004	21,00	998,01	1300,00	38,00	1000,00	47,00	11,45	1,20	1,96E-003	998,24	3,81E-004	92E+002	61E-011	38,00	29
30,00	5,00	10,00	0,42	2,60E-004	21,00	998,01	1300,00	40,00	1000,00	27,00	27,99	1,30	1,96E-003	998,24	3,81E-004	92E+002	61E-011	40,00	31

Rys. 6. Moduł „Proces filtracji przez warstwę porowatą przy stałym ciśnieniu”
Fig. 6. Module “Filtration process through porous layer at constant pressure”

Reasumując, aplikacja oblicza wartość współczynnika filtracji złoża skolmatowanego K_Z [m/s] będącą ilorazem wartości współczynnika filtracji złoża nieskolmatowanego K_0 [m/s] oraz współczynnika kolmatacji $WKLzb$ [-]. Następnie na podstawie wartości współczynnika przepuszczalności złoża nieskolmatowanego k_0 [m²] oraz współczynnika kolmatacji $WKLzb$ [-] program oblicza wartość współczynnika przepuszczalności złoża skolmatowanego k_Z [m²]. Na podstawie wysokości złoża L_F [cm] oraz współczynnika przepuszczalności k_Z [m²] program oblicza opór średni skolmatowanego złoża filtracyjnego R_{SZ} [m⁻¹]. Natomiast w zależności od wartości współczynnika lepkości dynamicznej zawiesiny μ_{iZ} [N·s/m²] i współczynnika przepuszczalności k_Z [m²] oblicza opór właściwy złoża filtracyjnego R_{WZ} [N·s/m⁴]. Na jego podstawie oraz biorąc pod uwagę obliczoną powierzchnię A_Z [m²] i wprowadzając wysokość złoża L_F [cm] aplikacja oblicza opór ogólny złoża filtracyjnego R_{OZ} [N·s/m⁵]. W dalszej kolejności oblicza i wyprowadza wartość wydatku objętościowego przepływu q_V [m³/s] i prędkości przepływu v_P [m/s].

W kolejnym kroku realizacji algorytmu program umożliwia przeniesienie wartości parametrów zmiennych niezależnych oraz obliczonych wartości parametrów zmiennych wynikowych do tabeli przedstawionej na rysunku 6. W ten sposób opisane wyniki eksperymentu, można w celu dalszej analizy, eksportować do arkusza kalkulacyjnego MS Excel lub też zapisać w postaci oddzielnego własnego pliku aplikacji charakteryzującego się rozszerzeniem „*.t03”. Aplikacja umożliwia graficzne przedstawienie zmian wybranych parametrów zmiennych wynikowych, w zależności od zmiany wartości wybranych parametrów zmiennych niezależnych. Na rysunku 7 przedstawiono przykładowo zmianę wartości zagęszczenia fazy stałej w filtracie B_F [mg/dm³] (lewa oś) oraz współczynnika kolmatacji złoża filtracyjnego $WKLz$ [-] (prawa oś) w zależności od zmiany ilości medium nadanego do procesu filtracji V_N [dm³]. Parametrami zmiennymi niezależnymi zaimplementowanymi w module są: objętość nadawy V_N [dm³], współczynnik kolmatacji złoża $WKLzb$ [-] oraz masa fazy stałej znajdującej się w nadawie Q_{SN} [g]. Parametry zmienne wynikowe to: masa fazy stałej w filtracie Q_{SF} [g], masa fazy stałej znajdująca się w blokadzie kolmatacyjnej Q_{SB} [g], masa fazy stałej zatrzymana w złożu Q_{SZ} [g], zagęszczenie fazy stałej w filtracie B_F [mg/dm³], grubość blokady kolmatacyjnej L_{KL} [mm], porowatość blokady kolmatacyjnej E_B [-], współczynnik kolmatacji blokady $WKLb$ [-], porowatość

złoża E_Z [-], współczynnik kolmatacji złoża WKL_Z [-], porowatość złoża z blokadą E_{ZB} [-], współczynnik kolmatacji złoża wraz z blokadą WKL_{Zb} [-], współczynnik filtracji skolmatowanego złoża K_{ZB} [m/s], współczynnik przepuszczalności skolmatowanego złoża k_{ZB} [m²], opór właściwy R_{WZ} [N·s/m⁴], średni R_{SZ} [m⁻¹] oraz ogólny złoża, R_{OZ} [N·s/m⁵], a także prędkość przepływu v_P [m/h] i wydatek objętościowy q_V [L/h].



Rys. 7. Moduł „Proces filtracji przez warstwę porowatą przy stałym ciśnieniu”
Fig. 7. Module “Filtration process through porous layer at constant pressure”

Konstrukcja aplikacji umożliwia umieszczenie na wykresie punktów wynikających z obliczeń – rysunek 7. Dodatkowym elementem jest możliwość aproksymacji, punktów pomiarowych funkcją wielomianową, maksymalnie 5 stopnia. Program oblicza ponadto odchylenie standartowe oraz współczynnik korelacji. Wyniki aproksymacji wyprowadzane są w oknie „Informacje”. Generowane wykresy można zapisać w formacie bitmapy (*.bmp) oraz formacie Windows Metafile Format (*.wmf) i w ten sposób dołączyć do dowolnego dokumentu zewnętrznego. Obliczenia

wykonane w programie „FILTRA” oraz eksportowane do wbudowanego edytora można zapisać w postaci pliku w formacie Rich Text Format (*.rtf). Ponadto wewnętrzny edytor umożliwia wczytywanie oraz edycję zapisanych wcześniej wyników obliczeń.

3. Wnioski

Program komputerowy „FILTRA” stanowi nowoczesne narzędzie w zakresie symulacji oraz obliczeń procesów przepływu medium przez warstwę porowatą oraz filtracji grawitacyjnej zawiesiny z uwzględnieniem zjawiska tworzenia tzw. blokad kolmatacyjnych.

- Aplikacja umożliwia charakterystykę zastosowanej porowatej warstwy filtracyjnej poprzez analizę granulometryczną, wynikiem której jest wyprowadzenie wartości współczynnika niejednorodności uziarnienia oraz wartości średnic charakterystycznych, tj.: d_{M0} , d_{Me} , d_{10} , d_{20} , d_{50} , d_{60} oraz wykresów.
- Program oblicza wartość współczynnika filtracji K [m/s] metodą zmiennego ciśnienia oraz kontrolnie, wykorzystując obliczone wielkości charakterystyczne, oblicza wartości współczynnika filtracji K [m/s] na podstawie równań empirycznych wg Hazena, Krügera, Seelheima, Slichtera oraz USBSC.
- Aplikacja na podstawie wartości współczynnika filtracji K [m/s] wyznaczonego metodą zmiennego ciśnienia oraz wartości współczynnika lepkości dynamicznej zawiesiny μ_{iz} [$N \cdot s/m^2$] i gęstości zawiesiny g_z [kg/m^3] oblicza i wyprowadza wartość współczynnika przepuszczalności k [m^2] oraz kontrolnie na podstawie porowatości złoża E_0 [-] i średnicy zastępczej d_z [mm] oblicza wartość współczynnika przepuszczalności k_C [m^2] na podstawie empirycznego równania wg Kozeny-Carmana.
- Program umożliwia wizualizację zmian wartości współczynnika filtracji K [m/s], przepuszczalności k [m^2], porowatości skolmatowanego złoża E_S [-] oraz współczynnika kolmatacji n [-] w zależności od zmiany czasu obniżania zwierciadła medium t_S [s].
- Aplikacja wykonuje obliczenia oraz wizualizację przedstawionych w publikacji wielkości charakterystycznych odnośnie przepływu medium przez warstwę porowatą oraz filtracji grawitacyjnej zawiesiny z uwzględnieniem zjawiska blokad kolmatacyjnych.

Literatura

1. **Badowska-Olenderk K., Czyżewski J., Naumczyk J.:** *Laboratorium podstaw chemii*. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej. 2006.
2. **Ciborowski J.:** *Inżynieria procesowa*. WNT. Warszawa 1973.
3. **Ives K. J.:** *Deep Bed Filtration – Theory and Practice*. Filtration & Separation, 17, March-April 1980.
4. **Khuzhayorov B. Kh.:** *Model of colmatation-suffosion filtration*. Journal of Porous Media, Issue 2, No. 2. 1999.
5. **Kowal A.:** *Odnowa wody – podstawy teoretyczne procesów*. Podręcznik Politechniki Wrocławskiej. 1996.
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. **Piecuch T.:** *Równanie Darcy jako podstawa analizy teoretycznej szczególnych przypadków procesu filtracji*. Rocznik Ochrony Środowiska, Tom 11 2009.
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 Ekosfery PAN, Oddział w Gdańsku – Filia Szczecin. 2008.
10. **Piekarski J.:** *Analiza wybranych parametrów kolmatacji w procesie filtracji grawitacyjnej*. Rocznik Ochrony Środowiska, Tom 11 2009.
11. **Piekarski J.:** *Investigations on colmatation during filtration process on the porous deposit*. Polish Journal of Environmental Studies. 2009.
12. **Rup K.:** *Procesy przenoszenia zanieczyszczeń w środowisku naturalnym*. Podręcznik WNT. 2006.
13. **Żurawski M., Skonieczny J., Koniecki A.:** *Współczynnik filtracji – zmodyfikowana metoda Kamińskiego*. Zeszyty Naukowe UAM. Poznań 1971.
14. **Żużikow W.A.:** *Filtracja. Teoria i praktyka rozdzielania zawiesin*. WNT. Warszawa 1985.

Application of Numerical Methods to Modelling of Gravitational Filtration Process

Abstract

The article presents the author's computer program "FILTRA" implemented in Delphi 2006 environment. To ensure the possibility of subsequent modification, the application consists of several modules, which are separate sub-programs. The first module refers to the grain size analysis and implements on the basis of preliminary data, calculations and plot of the grain size curve and characteristic diameters, which in the next step of application, are exported to the next module associated with calculation of filtration and permeability coefficients. Next, values calculated in this module are preliminary data for next module associated with the calculations of flow through porous layer and the process of gravitational filtration.

The computer program "FILTRA" is a modern tool for simulation and calculations of flow processes through porous layer and the gravitational filtration of suspension taking into account creation of so-called colmatation blockades.

The application allows to calculate and present characteristics of porous filter layer by granulometric analysis, which result in presentation of coefficient of heterogeneity of grain size and characteristic diameters: d_{M_0} , d_{M_e} , d_{10} , d_{20} , d_{50} , d_{60} and graphs.

The program calculates the value of filtration coefficient K [m/s] using method of variable pressure and for control, using the calculated characteristic values, it calculates value of filtration coefficient K [m/s] on the basis of empirical equations according to Hazen, Krüger, Seelheim, Slichter and USBSC.

This application, on the basis of filtration coefficient K [m/s], determined using method of variable pressure, and value of coefficient of dynamic viscosity m_z of suspension [$N \cdot s/m^2$] and suspension density g_z [kg/m^3] calculates and presents value of permeability coefficient k [m^2] and for control, on the basis of porosity of bed E_0 [-] substitute diameter d_z [mm] it calculates the value of permeability coefficient k_C [m^2] using empirical equation according to Kozena-Carman.

The program allows to visualize changes in the value of filtration coefficient K [m/s], permeability coefficient k [m^2], colmatated bed porosity E_s [-] and colmatation coefficient n [-] depending on time of medium surface lowering t_s [s].

The program performs the calculations and visualization of characteristic parameters, presented in the paper, concerning flow through porous layer and the suspension gravitational filtration taking into account the phenomenon colmatation blockades.

