

Tadeusz SIWIEC

*Zakład Wodociągów i Kanalizacji
Katedra Budownictwa i Geodezji
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Warszawa*

PARAMETRY PŁUKANIA ZŁÓŻ CHALCEDONITOWYCH

BACKWASHING PARAMETERS OF CHALCEDONITE BEDS

The objective of this research was to investigate the minimal fluidization velocity and changes of expansion of chalcedonite bed in function of backwashing velocity. Investigations were provided for ten fractions size 3,15-5,0; 2,0-3,15; 1,5-2,0; 1,25-1,5; 1,0-1,25; 0,8-1,0; 0,63-0,8; 0,5-0,63; 0,4-0,5; 0,315-0,4 mm. The experiments were conducted in transparent column, water flow rate was changed and changes of bed - from fixed till fluidic state were observed. Determination of rinsing velocity, when the bed pass into the fluidic state allowed to find the multinomial function $V_{mf} [m/h] = -2,66 \cdot d[mm] + 46,72 \cdot d[mm]^2 - 8,92$ with $R^2 = 0,996$. The value of C_1 and C_2 were found for formula Wen and Yu. This formula fixes Reynolds number in the conditions of minimal fluidization and Archimedes number. Formula is as follows: $Re_{mf} = \sqrt{11,2^2 + 0,025 \cdot Ar} - 11,2$. The graphs showing correlation of expansion, flow velocity and grain diameter were presented. This correlation is described as multinomial function of the second order but for practical purpose the linear function can be used because the error is very small.

1. Wprowadzenie

Płukanie złóż jest jednym z procesów zapewniających prawidłową pracę filtrów pospiesznych. Polega na usunięciu zanieczyszczeń, które pozostały wewnątrz złoża podczas filtracji, przez to umożliwieniu ponownego filtrowania wody. W szczególności proces ten polega na wymuszeniu przepływu strumienia wody w kierunku przeciwnym niż kierunek filtracji, czyli w klasycznych filtrach z dołu do góry. Podczas takiego procesu woda przepływając między ziarnami złoża powinna wywołać dwa istotne zjawiska. Jednym jest wyniesienie zdeponowanych podczas filtracji zanieczyszczeń, które zatrzymały się przestrzeniach międzyziarnistych oraz słabo przyłgnęły do powierzchni ziaren, a drugim oderwanie zanieczyszczeń, które silniej przywarły do powierzchni tych ziaren. Pochopnie rozumując można by stwierdzić, że w pierwszym przypadku wystarczyłby słaby strumień wody, który uniósłby drobne zanieczyszczenia i usunął do kanalizacji natomiast w drugim

potrzebny jest strumień, który spowoduje powstanie na tyle silnych sił ścinających oraz zderzenia ziaren, że umożliwi oderwanie przyklejonych do powierzchni cząstek zanieczyszczeń. W rzeczywistości, aby osiągnąć obydwie cele potrzebny jest dość silny strumień wody, gdyż strumień o zbyt niskim natężeniu ma dość dużą prędkość wewnątrz złoża (w przestrzeniach międzyziarnistych) i pozwala na przemieszczanie się zanieczyszczeń z dolnych partii do wyższych, lecz nad złożem jego prędkość jest na tyle niska, że cięższe cząstki nie są w stanie dotrzeć do wylotu filtru. Z tego względu potrzebny jest na tyle silny strumień wody, aby uzyskać wyniesienie cząstek zanieczyszczeń zarówno słabo, jak i silnie przytwierdzonych do powierzchni ziaren złoża.

Podczas przepływu strumienia wody przez złożo na każde ziarno oddziałują trzy siły. Siła ciężkości skierowana „w dół”, oraz siła wyporu i siła dynamiczna wywołana strumieniem wody skierowane „do góry”. Siła ciężkości i siła wyporu mają wartość stałą, natomiast siła dynamiczna jest zmienna i zależy od prędkości przepływu wody. Jeśli suma siły wyporu i siły dynamicznej zrównoważy siłę ciężkości wówczas złożo staje się nieważkie i osiąga stan, który nazywany jest stanem fluidalnym. Od tej chwili każde zwiększenie prędkości płukania przekłada się na podniesienie górnej granicy złoża, czyli na jego ekspansję. Podczas występowania ekspansji złoża zmieniają się niektóre parametry, przede wszystkim porowatość międzyziarnowa.

Najważniejszymi cechami opisującymi zachowanie się złoża podczas płukania są minimalna prędkość, przy której złożo przechodzi w stan fluidalny nazywana minimalną prędkością fluidyzacji i oznaczana V_{mf} oraz zmiany ekspansji złoża w funkcji prędkości płukania. Parametry te mają istotne znaczenie przy doborze pompy płucznej wraz oprzyrządowaniem, które muszą być tak dobrane, aby podczas płukania złożo przeszło w stan fluidalny, oraz aby ekspansja nie była taka, przy której drobne frakcje złoża mogłyby być wynoszone do kanalizacji razem ze strumieniem popłuczyn. Aby móc sprawnie zaprojektować układ płuczny w dowolnej stacji wodociągowej potrzebne są pewne dane materiałowe oraz zachowanie się ziaren danego złoża podczas płukania. Ponieważ w ostatnich latach w niektórych stacjach jako wypełnienie filtrów odżelaziających jak i odmanganiających został wykorzystany względnie nowy minerał, jakim jest chalcedonit [15,16] w niniejszym opracowaniu zostały zamieszczone warunki płukania tego minerału.

2. Charakterystyka chalcedonitu

Chalcedonit użyty do badań pochodził z kopalni w Inowłodziu. Jest to skała powstała w wyniku sylikfikacji skał wapienno-marglistych w najniższych ogniwach oksfordu w skrzydłach antykliny inowłodzkiej. W kopalni Inowłódz chalcedonit tworzy spękany zespół nieregularnych ławic o miąższości 5 – 50 cm, przedzielanych przewarstwieniami mułkowo-ilastymi. [6,11]

Chalcedonit w analizowanym złożu występuje w trzech odmianach różniących się barwą [6]:

- mleczno-niebieskiej o nierównym, gładkim przełamie, dzieląca się na ostrokrawędziowe bloczki,
- szaro-niebieskiej o szorstkiej powierzchni przełamu,
- czerwono-brunatno-żółtej z nalotami tlenków manganu.

Podstawowe własności chalcedonitu zostały zamieszczone w tabeli 1.

Tab. 1. Własności chalcedonitu z kopalni "Inowódz" [4]

Tab. 1. Chalcedonits parameters from mine "Inowódz" [4]

Skład chemiczny, %		Własności fizyczne		
		Parametr	Jednostka	Wartości
SiO ₂	94,0 ÷ 99,0	Gęstość	kg/m ³	2620 ÷ 2670
Al ₂ O ₃	0,4 ÷ 3,6	Gęstość nasypowa	kg/m ³	1000 ÷ 1200
Fe ₂ O ₃	0,1 ÷ 0,8	Porowatość	%	15 ÷ 30
CaO	0,1 ÷ 1,2	Nasiąkliwość	%	4 ÷ 10
MgO	0,0 ÷ 0,3	Wytrzymałość na ściskanie	MPa	60 ÷ 120
Na ₂ O	0,04 ÷ 0,2	Ścieralność w bębnie Devala	%	6 ÷ 15
K ₂ O	0,1 ÷ 0,5	Liczba olejowa	g/100g mączki	26

Jak widać jest to minerał o gęstości zbliżonej do gęstości piasku kwarcowego, lecz większej porowatości międzyziarnowej, o czym można wnioskować analizując gęstość i gęstość nasypową. Dodatkowo różni od piasku kwarcowego ścieralnością, nasiąkliwością i porowatością wewnętrzną.

3. Metodyka badań

Chalcedonit uzyskany od producenta w szerokim zakresie frakcji przed rozpoczęciem badań został rozseparowany przy pomocy sit na 10 frakcji o zakresach wymiarów 0,315 mm ÷ 0,4 mm; 0,4 mm ÷ 0,5 mm; 0,5 mm ÷ 0,63 mm; 0,63 mm ÷ 0,8 mm; 0,8 mm ÷ 1,0 mm; 1,0 mm ÷ 1,25 mm; 1,25 mm ÷ 1,5 mm; 1,5 mm ÷ 2,0 mm; 2,0 mm ÷ 3,15 mm; 3,15 mm ÷ 5,0 mm. Wymiary badanych ziaren wybiegały znacząco poza zakres typowych średnic ziaren stosowanych w filtrach pospiesznych, lecz tak duża liczba punktów pomiarowych umożliwiała wyciągnięcie bardziej uogólnionych wniosków.

Każda frakcja była badana oddzielnie, a w zakres badań wchodziły:

- gęstość – badana metodą piknometryczną [10]
- gęstość objętościowa w stanie luźnym [8]
- straty ciśnienia podczas przepływu wody przez złoże nieruchome i złoże w stanie fluidalnym
- minimalna prędkość fluidyzacji
- ekspansja złoża w funkcji prędkości płukania

Gęstość oraz gęstość objętościowa służyła do określenia porowatości [7] chalcedonitu. Ponieważ chalcedonit jest minerałem o dość znaczącej porowatości wewnętrznej, aby uzyskać dane o porowatości międzyziarnistej (jamistości [9]) ziarna po odpowiednim wysuszeniu były, w warunkach obniżonego ciśnienia nasycane naftą o dokładnie określonej gęstości metodą piknometryczną [10]. Po obcieknięciu, usunięciu menisku wypukłego na otworach kapilarnych i zważeniu określony został udział por wewnątrznych. Badanie to

pozwoili skorygować wynik porowatości i otrzymać porowatość międzyziarnow, która jest właściwym parametrem do wyznaczania istotnych cech materiałowych (sferyczność) [13] i warunków płukania.

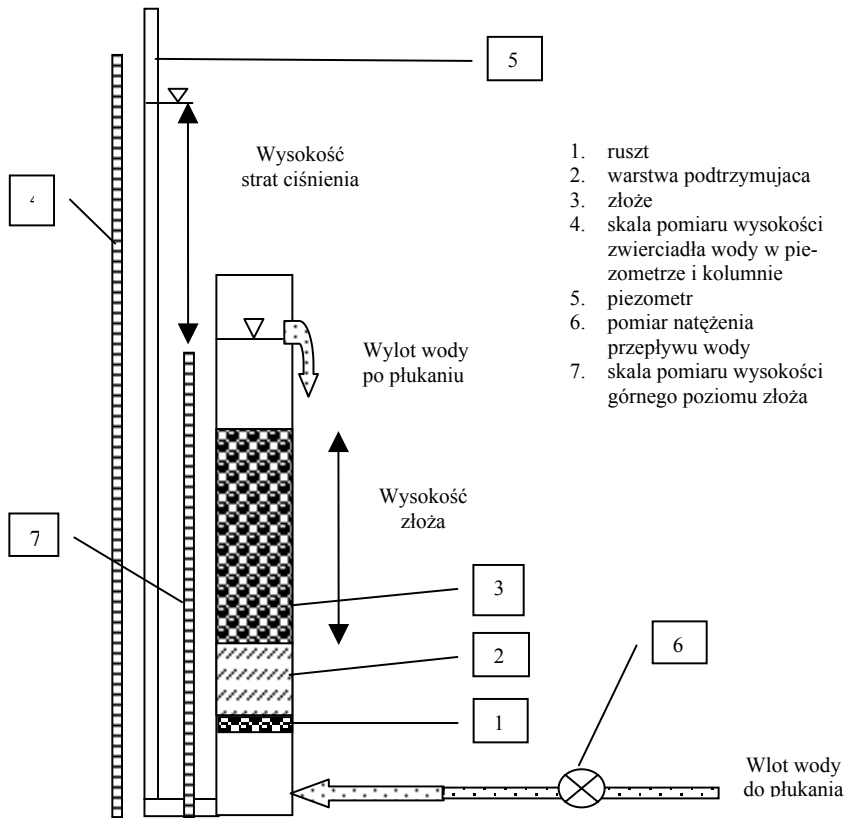
Straty ciśnienia, minimalna prędkość fluidyzacji oraz ekspansja złoza były mierzone przy wykorzystaniu stanowiska zamieszczonego na rys. 1.

Woda używana do płukania tłoczona była ruociągim w dolnej części rysunku i przepływała przez przepływomierz 6 Promag A (Endress+Hauser), a następnie wpływała do kolumny filtracyjnej. Kolumna zbudowana była z przezroczystej rury z PLEXI o średnicy wewnętrznej 52 mm, w której dolnej części zamontowany był ruszt z wkręconymi typowymi dyszami filtracyjnymi. Na ruszt nasypywany był żwir, który stanowił warstwę podtrzymując, na którą z kolei nasypywane były warstwy filtracyjne poddawane badaniom.

Badane były;

- straty ciśnienia w funkcji prędkości płukania podczas przepływu wody przez złoze nieruchome
- straty ciśnienia w funkcji prędkości płukania podczas przepływu wody przez złoze w stanie fluidalnym
- minimalna prędkość fluidyzacji
- zmiany ekspansji złoza

Straty ciśnienia mierzono jako różnice rzędnych zwierciadła wody w piezometrze podłączonym do kolumny pod rusztem oraz zwierciadła wody w kolumnie, które związane było wysokościov z zamontowanym przelewem. Ponieważ celem nadrzędnym było wyznaczenie strat ciśnienia w warstwie filtracyjnej wszystkie pomiary danego złoza poprzedzane były pomiarami strat ciśnienia w ruszcie i warstwie podtrzymującej. Następnie po zmierzeniu strat ciśnienia w ruszcie, warstwie podtrzymującej i złoza oraz po odjęciu strat ciśnienia w ruszcie i warstwie podtrzymującej otrzymywano straty ciśnienia w samej warstwie filtracyjnej. Ponieważ nigdy nie udaje się otrzymywać jednakowe wysokości warstwy filtracyjnej jako punkt odniesienia przyjęto straty jednostkowe, czyli przeliczane na jednostkę wysokości złoza.



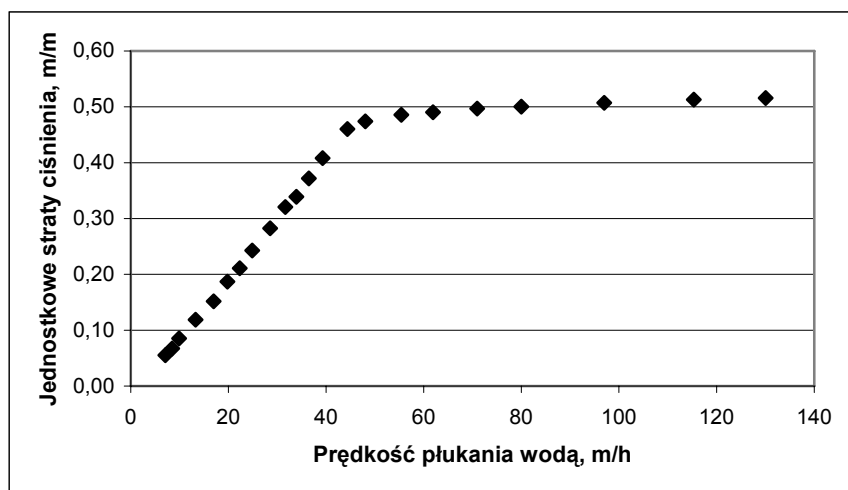
Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego

Fig. 1. The scheme of research installation

4. Wyniki badań i ich omówienie

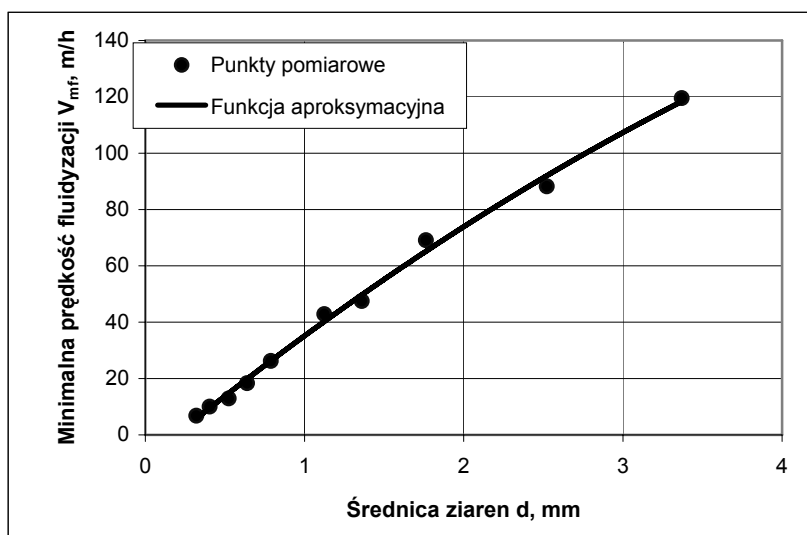
Wyniki badań jednostkowych strat ciśnienia w funkcji prędkości płukania dla przykładowego złoża o frakcji 1,0-1,25 mm zostały pokazane na rys. 2.

Jak widać straty ciśnienia w złożu nieruchomym są funkcją niemal liniową prędkości płukania. W badaniach [12] potwierdzone zostały wcześniejsze doniesienia [1], że dla liczb Reynoldsa $Re < 6$ punkty pomiarowe można aproksymować funkcją liniową natomiast powyżej słuszny jest zastosowanie wielomianu drugiego stopnia. Powyżej minimum fluidyzacji straty ciśnienia są prawie stałe i bardzo mało zależne od prędkości. Stąd przecięcie się tych dwóch funkcji wyznacza punkt określający minimalną prędkość fluidyzacji V_{mf} . Podobne wykresy zostały wykonane dla wszystkich frakcji, co pozwoliło wyznaczyć V_{mf} dla całego zakresu frakcji chalcedonitu. Wyniki tych badań zostały zamieszczone na rys. 3.



Rys. 2. Zależność jednostkowych strat ciśnienia od prędkości płukania dla złoża chalcedonitowego frakcji 1,0-1,25 mm

Fig. 2. Elementary head loss in function of backwashing velocity for chalcedonite bed with fraction of 1,0-1,25 mm



Rys. 3. Zależność minimalnej prędkości fluidyzacji złoża chalcedonitowego od średnicy ziaren

Fig. 3. Minimum fluidisation velocity in function of diameter grains of chalcedonite bed

Dla określenia zależności aproksymacyjnej znaleziona została linia trendu, która jest pokazana linią ciągłą. Poszukiwano zależności wśród funkcji wielomianowej, liniowej, logarytmicznej itp. Najlepsze dopasowanie uzyskano dla linii pokazanej na Rys. 3 opisanej funkcją wielomianową drugiego stopnia średnicy ziaren, która wyraża się następującą zależnością:

$$V_{mf} [\text{m/h}] = -2,66 \cdot d^2 [\text{mm}] + 46,72 \cdot d [\text{mm}] - 8,92 \quad R^2 = 0,996 \dots\dots\dots(1)$$

Funkcję tę można stosować do celów praktycznych, czyli do projektowania układów płucznych i doboru pomp zastosowanych do płukania, o czym świadczy wysoki współczynnik determinacji R^2 . Również dość wysokie R^2 , bo rzędu 0,93-0,96 uzyskano dla funkcji liniowej, potęgowej oraz logarytmicznej jednak przebieg tych funkcji wykazywał zbyt duże odstępstwa w różnych zakresach średnic ziaren. Funkcja liniowa wykazywał znaczne odstępstwa dla niskich wartości średnic ziaren, potęgowa dla wysokich natomiast logarytmiczna dobrze dopasowywała się jedynie dla środkowego zakresu średnic.

Wen i Yu [17] rekomendowali wyrażenie (2) uzyskane z przekształceń wzorów przybliżonych, który wiąże liczbę Reynoldsa w warunkach minimum fluidyzacji Re_{mf} z liczbą Archimedesesa Ar .

$$Re_{mf} = \sqrt{C_1^2 + C_2 \cdot Ar} - C_1 \dots\dots\dots(2)$$

gdzie C_1 i C_2 stałe zależne od rodzaju złoża, a Re_{mf} oraz Ar liczby wyrażane równaniami (3) i (4):

$$Re_{mf} = \frac{V_{mf} \cdot d}{\nu} \dots\dots\dots [5] \dots\dots\dots(3)$$

$$Ar = \frac{d^3 \cdot (\rho_s - \rho_f) \cdot g}{\nu^2 \cdot \rho_f} \dots\dots\dots [5] \dots\dots\dots(4)$$

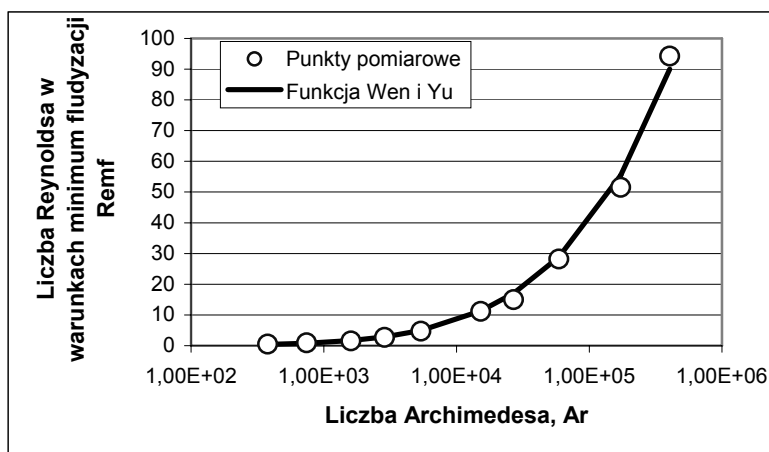
gdzie: d – średnica ziaren, ρ_s – gęstość ziaren złoża, ρ_f – gęstość wody, ν – kinematyczny współczynnik lepkości. Ponieważ liczby Re i Ar muszą być bezwymiarowe wszystkie wielkości należy wstawiać w jednolitym układzie jednostek np. SI. Zależność Re_{mf} od Ar dla chalcedonitu została przedstawiona na Rys. 4.

Analizując wyniki badań znalezione zostały wartości stałych C_1 i C_2 dla złoża chalcedonitowego, które pozwoliły przedstawić wzór Wen i Yu w formie dopasowanej do takiego typu złoża.

$$Re_{mf} = \sqrt{11,2^2 + 0,025 \cdot Ar} - 11,2 \quad [12] \dots\dots\dots(5)$$

Przy znanej liczbie Archimedesesa, która jest wielkością stałą dla danego złoża w wodzie o określonej temperaturze wzór (5) pozwala wyznaczyć Liczbę Reynoldsa w warunkach minimum fluidyzacji, a następnie znając średnicę ziaren i kinematyczny współczynnik lepkości prędkość V_{mf} .

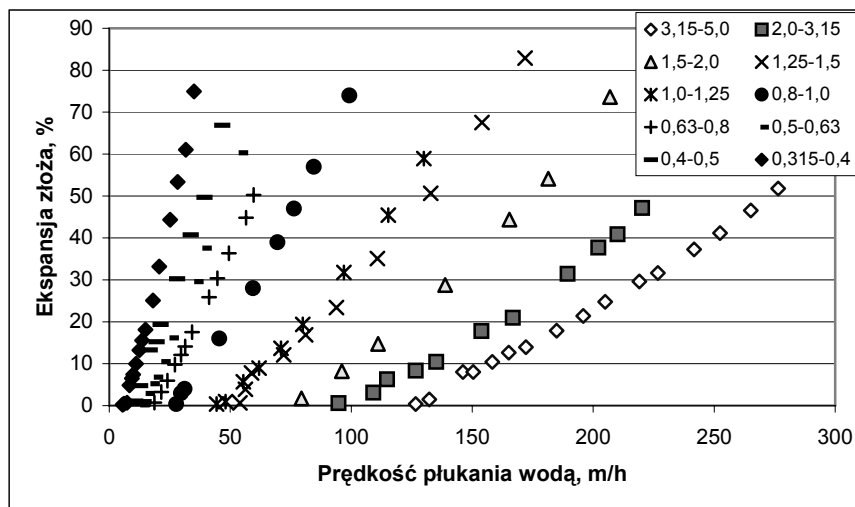
Zachowanie się złoża w warunkach płukania zobrazowywane jest przez jego ekspansję. Znajomość zmian ekspansji jest ważnym parametrem, gdyż pozwala przewidywać skuteczność płukania i wynoszenia zanieczyszczeń, a nie wynoszenia ziaren złoża. Znając zależność ekspansji od prędkości płukania można określić jak wysoko będą mogły się wznosić ziarna o różnych średnicach i czy istnieje zagrożenie ucieczki drobniejszych frakcji z wodami popłuczynymi do kanalizacji.



Rys. 4. Zależność liczby Reynoldsa w warunkach minimum fluidyzacji złoża chalcedonitowego od liczby Archimedeasa

Fig. 4. Reynolds number for minimum fluidisation conditions of chacedonite bed in function of Archimedes number

Wyniki badań ekspansji złoża wszystkich badanych frakcji w funkcji prędkości płukania pokazane zostały na rys. 5.



Rys. 5. Zależność ekspansji chalcedonitu w funkcji prędkości płukania i średnicy ziaren

Fig. 5. Chalcedonite expansion in function of backwashing velocity for different grains diameter

Jak widać ekspansja zależy od zarówno od prędkości płukania jak i średnic ziaren złoza. Pobieżny ogląd punktów pokazanych na rys. 5. może sugerować, że zmiany ekspansji w funkcji prędkości płukania mają przebieg liniowy. Jednak dokładniejsze badania losowości reszt w analizie regresji [18] pozwoliła stwierdzić, że mimo iż punkty pomiarowe aproksymowane funkcjami liniowymi miały współczynnik determinacji R^2 rzędu 0,98-0,99 to prawidłowy przebieg zależności jest paraboliczny [12]. Stąd analizowana funkcja miała zależność w postaci:

$$E [\%] = a \cdot V^2 [\text{m/h}] + b \cdot V [\text{m/h}] + c \quad \dots\dots\dots(6)$$

Aby powiązać współczynniki a , b i c z cechami materiałowymi wykonano badania regresji wiążące te współczynniki z liczbą Archimedesesa. Otrzymane zostały następujące wartości:

$$a = 232,29 \cdot Ar^{-0,4404} \quad R^2 = 0,904 \dots\dots\dots(7)$$

$$b = 2011,6 \cdot Ar^{-0,5549} \quad R^2 = 0,942 \dots\dots\dots(8)$$

$$c = -15,166 \pm 5,308 \quad \dots\dots\dots(9)$$

Dla wartości c nie udało się znaleźć zależności funkcyjnej, gdyż otrzymane punkty na wykresie wykazywały przypadkowe rozrzuty. Dlatego ich wartości zostały opisane przy pomocy średniej z odchyleniem standardowym.

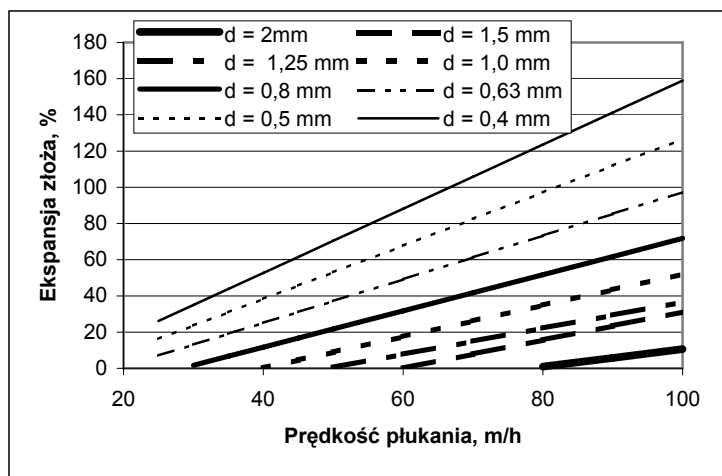
Ponieważ, jak wspomniano wcześniej błąd opisu liniowego jest mały, do celów praktycznych można wykorzystywać funkcje zamieszczone w tabeli 2 oraz zobrazowane graficznie na rys. 6 i 7, gdzie przedstawiono zmiany ekspansji w funkcji obydwu istotnych parametrów to jest prędkości płukania i średnicy ziaren.

Tab. 2. *Ekspansja złoza chalcedonitowego w funkcji prędkości płukania*

Tab. 2. *Expansion of chalcedonite bed in function of backwashing velocity*

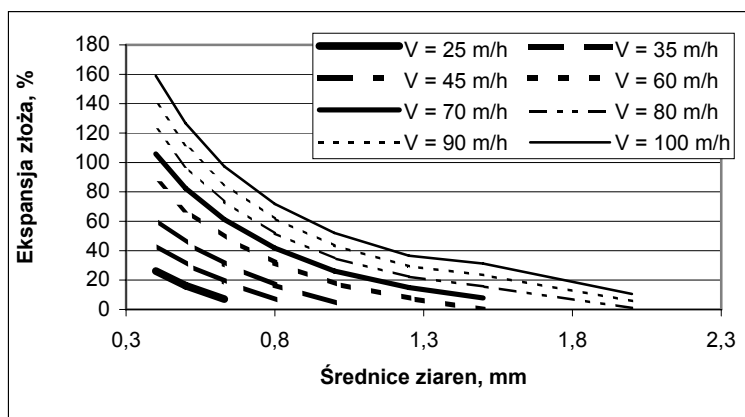
Zakres frakcji	Równanie	R^2
3,15 – 5,0 mm	$E [\%] = 0,332 \cdot V [\text{m/h}] - 42,399$	0,9954
2,0 – 3,15 mm	$E [\%] = 0,3704 \cdot V [\text{m/h}] - 37,546$	0,9846
1,5 – 2,0 mm	$E [\%] = 0,5571 \cdot V [\text{m/h}] - 45,709$	0,9898
1,25 – 1,5 mm	$E [\%] = 0,6657 \cdot V [\text{m/h}] - 35,525$	0,9905
1,0 – 1,25 mm	$E [\%] = 0,6802 \cdot V [\text{m/h}] - 32,553$	0,9908
0,8 – 1,0 mm	$E [\%] = 1,001 \cdot V [\text{m/h}] - 28,342$	0,9942
0,63 – 0,8 mm	$E [\%] = 1,2035 \cdot V [\text{m/h}] - 23,009$	0,9980
0,5 – 0,63 mm	$E [\%] = 1,4714 \cdot V [\text{m/h}] - 20,521$	0,9965
0,4 – 0,5 mm	$E [\%] = 1,771 \cdot V [\text{m/h}] - 18,118$	0,9964
0,315 – 0,4 mm	$E [\%] = 2,4899 \cdot V [\text{m/h}] - 17,004$	0,9927

Wykorzystując równania zamieszczone w tabeli 2 wykonane zostały wykresy, które mogą być wykorzystane do praktycznego określania ekspansji w funkcji prędkości płukania dla ziaren złóż o określonej średnicy (Rys. 6). Zależność ekspansji od średnicy ziaren dla określonej prędkości płukania nie jest funkcją liniową, co widać na Rys. 7, a dobrze ją opisuje funkcja wielomianowa trzeciego stopnia.



Rys. 6. Zależność ekspansji chalcedonitu w funkcji prędkości płukania i średnicy ziaren

Fig. 6. Chalcedonite expansion in function of backwashing velocity for different grains diameter



Rys. 7. Zależność ekspansji chalcedonitu w funkcji prędkości płukania i średnicy ziaren

Fig. 7. Chalcedonite expansion in function of grains diameter for different backwashing velocity

5. Wnioski

Przedstawione w niniejszym artykule wyniki badań pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków.

1. Minimalną prędkość fluidyzacji względem średnicy ziaren złoża można określić funkcją paraboliczną. Funkcja liniowa, potęgowa i logarytmiczna też pozwalały uzyskać wysoką wartość współczynnika determinacji R^2 , jednak dla różnego zakresu średnic występowały znaczne odchyłki. Funkcja liniowa wykazywał znaczne odstępstwa dla niskich wartości średnic ziaren, potęgowa dla wysokich natomiast logarytmiczna dobrze dopasowywała się jedynie dla środkowego zakresu średnic
2. Jak wykazano w innych badaniach [12] wzór Wen i Yu nie ma charakteru wzoru uniwersalnego i znajdujące się w nim stałe C_1 i C_2 zależą od rodzaju materiału. Znalezione w ramach niniejszych badań wzór w pełnej postaci dobrze opisuje zależność liczby Reynoldsa w warunkach minimum fluidyzacji od liczby Archimedes'a.
3. Ekspansja złoża dla poszczególnych średnic ziaren złoża, jak wykazała analiza regresji opisywana jest paraboliczną funkcją prędkości płukania. Jednak dla celów praktycznych ekspansję w funkcji prędkości płukania dla poszczególnych rodzajów ziaren złoża można wyznaczyć przy pomocy funkcji liniowej (Rys. 6). Natomiast dla określenia ekspansji w funkcji średnicy ziaren dla określonej prędkości płukania trzeba wykorzystywać funkcję wielomianową trzeciego stopnia. W obu przypadkach popełniany błąd jest mały, o czym świadczą wysokie wartości R^2 .

Bibliografia

- [1] Cleasby J.L., Kuo-Shuh Fan: Predicting fluidization and expansion of filter media. Journal of the Environmental Engineering Div. 1981, vol.107, no. EE3, June, pp. 455-471.
- [2] Grace J.R.: Handbook of multiphase systems. Ed. Gad Hesrtroni, Chapt. 8.1. Fluidized bed. Hydrodynamics. Hemisphere Publishing Corporate, Washington, New York, London 1982
- [3] Moll H.G.: Die Expansion des Filtermaterials beim Spülen. Wasser-Abwasser, GWF, 1988, vol.129, H-6, pp.412-416
- [4] Kasza B., Naziemiec Z., Pabis J.: Wykorzystanie odpadów chalcedonitowych z kopalni „Inowłódz”. Mat. Konf. nt. Gospodarka mineralnymi surowcami odpadowymi z górnictwa i energetyki. Przegląd, 1996, 1-6.
- [5] Koch R., Noworyta A.: Procesy mechaniczne w inżynierii chemicznej. Inżynieria chemiczna, WNT Warszawa 1992.
- [6] Materiały informacyjne MIKROSIL Sp. z o.o. Radom ul. Zborowskiego 14 oraz Kopalnia Chalcedonitu „Inowłódz” Inowłódz ul. Spalska 54
- [7] PN-76/B-06714/09 – Kruszywa mineralne. Badania. Oznaczanie porowatości

- [8] PN-76/B-06714/06 – Kruszywa mineralne. Badania. Oznaczanie gęstości objętościowej w cylindrze pomiarowym.
- [9] PN-89/B-06714.01 – Kruszywa mineralne. Badania. Podział, terminologia.
- [10] PN-EN 1097-7/2001 – Badanie mechanicznych i fizycznych własności kruszyw. Cz. 7. Oznaczanie gęstości wypełniacza. Metoda piknometryczna.
- [11] Ratajczak T., Wyszomirski P.: Charakterystyka mineralogiczno-surowcowa chalcedonitów spongilitowych z Teofilowa nad Pilicą. Gosp. Sur. Min., 1991, nr 7, str. 65-84.
- [12] Siwiec T. Warunki płukania jednowarstwowych i dwuwarstwowych filtrów pospiesznych. Wyd. SGGW, Warszawa 2007
- [13] Siwiec T.: The sphericity of grains of filtration beds applied for water treatment on examples of selected minerals. Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, vol. 10, Issue 1, 2007, Topic Civil Engineering, 6 March 2007
- [14] Siwiec T., Michel M.M. Granops M. Badanie efektywności uzdatniania wody na złożu chalcedonitowym oraz badanie wybranych parametrów chalcedonitu. VI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna "Zaopatrzenie w Wodę, Jakość i Ochrona Wód" Poznań 6-8 września 2004, t. II str. 185-194
- [15] Sozański M.M., Jeż-Walkowiak J., Weber Ł.: Piasek chalcedonitowy jako nowe złożo w odziedzianiu i odmanganianiu wód podziemnych. Konferencja Naukowo-Techniczna. Woda-Człowiek-Środowiska; Wrzesnia-Licheń 2004.
- [16] Weber Ł., Szambelańczyk K.: Badania technologiczne nad uzdatnianiem wody podziemnej na złożach chalcedonitowych na Stacji Uzdatniania Wody –Nowy Folwark. Forum Eksploatatora 2006, (22) nr 1, str. 31-33
- [17] Wen C.Y., Yu Y.H.:Mechanics of fluidization. Chemical Engineering Progress, Symposium Series 1966, 62 (62), pp. 100-111.
- [18] Zieliński W.: Analiza regresji. Wyd. Fundacja "Rozwój SGGW", Warszawa 1998