

Tadeusz SIWIEC

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

## ZMIANY POROWATOŚCI MIĘDZYZIARNOWEJ ZŁOŻA PODCZAS PROCESÓW FILTRACJI I PŁUKANIA

### CHANGES OF VOID FRACTION IN BED DURING FILTRATION AND BACKWASHING PROCESSES

*Paper presents changes of void fraction in bed during filtration and backwashing processes. Following stages were analyzed: bed with loose arrangement at the beginning of the filtration process, during the compaction and during fulfilling of void volume with pollution. The processes during backwashing such as minimum point of fluidization and changes of porosity as result of bed expansion during backwashing were analyzed as well. Data from analyze for 8 minerals shown that the changes of void fraction, as a result of compaction, are from 0,814 for sand to 0,876 for clinoptilolite. This gives the conclusion that the compaction process is the best for sand. There was shown that while pollution is setting up in void volume and the head losses are bigger then 3m the father growth doesn't depend on grains diameter, their porosity at the beginning and the shape of grains. The increase of void fraction at the fluidization minimum point is equal to 2 % in the relation to void formation in loose arrangement and 14% to 24% in relation to compact arrangement.*

## 1. Wprowadzenie

Porowatość międzyziarnowa złożeń jest czynnikiem wpływającym na efektywność zarówno procesu filtracji jak i płukania. Mała porowatość wpływa na poprawę skuteczności filtracji, czyli uzdatniania wody, lecz podwyższa opory hydrauliczne jej przepływu. Podczas przebiegu procesu filtrowania wody osadzające się w przestrzeniach międzyziarnowych zanieczyszczenia obniżają porowatość, co skutkuje podwyższaniem się strat ciśnienia.

Podczas cyklu filtracyjnego można wyróżnić kilka stanów złożeń różniących się porowatością, takich jak:

- a. porowatość złożeń po zakończonym płukaniu – wówczas złożeń jest luźne, lub bardzo mało zagęszczone jedynie pod wpływem własnego ciężaru,
- b. porowatość mniejsza w stosunku do przypadku „a” spowodowana ciężarem własnym złożeń i siłą wywołaną przepływem wody w dół podczas filtracji,

- c. sukcesywne zmniejszanie się porowatości wywoływane osadzaniem się zanieczyszczeń w porach złoża podczas filtracji,
- d. zwiększenie się porowatości w chwili rozpoczynania płukania, które spowodowane jest przepływem od dołu do góry strumienia płucznego. Jest to stan nazywany minimum fluidyzacji.
- e. dalsze zwiększenie się porowatości podczas płukania wywołane intensywnym przepływem zwiększenia strumienia płucznego. Wówczas złożo zajmuje większą przestrzeń wewnątrz filtru, czyli jest w stanie ekspansji.

Po zakończeniu płukania złożo osiada na warstwie podtrzymującej i rozpoczyna się cykl filtracji, w którego początkowej fazie złożo jest w stanie luźnym (przypadek „a”).

Jak widać porowatość w całym cyklu filtracyjnym jest zmienna, lecz nie w każdym etapie ma jednakowy wpływ na projektowanie i eksploatację. Przypadek wymieniony w punkcie „a” nie ma żadnego znaczenia dla analizy procesu ponieważ trwa bardzo krótko i pogorszona jakość filtratu nie jest zauważalna przez konsumenta, gdyż problem ten mieści się w ramach spuszczenia „pierwszego filtratu”. Porowatość na początku procesu filtracji powinna być punktem odniesienia do analizy przyrostu kolmatacji, a co za tym idzie przyrostu strat ciśnienia podczas deponowania zanieczyszczeń w złożu i służy do analizy strat ciśnienia i doboru pomp. Przypadek wymieniony w punkcie „c” jest obrazem przyrostu strat ciśnienia w złożu, a osiągnięcie określonej wartości staje się sygnałem do zatrzymania filtracji i rozpoczęcia płukania. Stan początku fluidyzacji (przypadek „d”) nie ma wartości eksploatacyjnej, lecz istotną wartość projektową, umożliwia określenie minimalnej prędkości fluidyzacji, czyli minimalnej prędkości, przy której złożo zaczyna ekspandować. Jest to kryterium dolnej wartości zakresu pracy pompy płuczonej (minimalnego natężenia przepływu strumienia płucznego). Przypadek „e”, podobnie jak „d” pozwala na właściwe zaprojektowanie systemu płukania filtrów. Analizując zmiany ekspansji w zależności od wysokościowego usytuowania krawędzi wylotowej filtru można określić maksymalne natężenie przepływu strumienia płucznego. Znając oba krańce, czyli minimalne i maksymalne natężenia przepływu można dobrać pompę płuczną, która powinna zapewnić właściwą ekspansję złoża zapewniającą skuteczne jego wypłukanie.

## 2. Istota problemu

Porowatość międzyziarnową w stanie spoczynku oblicza się zgodnie z normą [11]

$$\varepsilon_0 = \frac{\rho_s - \rho_p}{\rho_s} \dots\dots\dots(1)$$

gdzie:  $\rho_s$  – gęstość właściwa szkieletu,  $\rho_p$  – gęstość objętościowa [19]. Tak zapisana definicja wprowadza pewne zamieszanie w nazewnictwie, gdyż przeczy nomenklaturze przyjętej w normie [13], w której zdefiniowano porowatość jako stosunek objętości porów wewnętrznych do całkowitej objętości ziaren. Wynika stąd, że porowatość dotyczy porów wewnątrz ziaren, a nie przestrzeni między ziarnami, którą tej normie nazwano jamistością.

Jamistość zdefiniowano jako udział przestrzeni międzyziarnowej w objętości całkowitej kruszywa. Jamistość może być wyrażana w stanie luźnym lub zagęszczonym. Ponieważ w układach filtracyjnych posługujemy się przestrzeniami międzyziarnowymi, stąd w świetle ostatniej definicji bardziej właściwym pojęciem będzie jamistość. Jednak ze względu na

powszechność takiego nazewnictwa w dalszej części pozostawione zostało pojęcie „porowatość” które należy interpretować jako porowatość międzyziarnowa, czyli jamistość.

Zjawiska analizowane w niniejszym opracowaniu odnoszą się do trzech modeli, to jest opisu zjawisk podczas przepływu wody przez porowatą warstwę nieruchomą, zjawisk zachodzących w stanie minimum fluidyzacji, oraz zmian ekspansji złoża podczas płukania.

Straty ciśnienia  $H$  podczas przepływu wody przez złożo nieruchome opisywane są przy przepływie laminarnym ( $Re < 6$ ) wzorem Blake-Kozeny lub Kozeny-Carmana (wzór 2), a przy wyższych prędkościach wzorem Erguna (wzór 3). [1,4]

$$H = \frac{k_1}{g} \cdot v \cdot V \cdot L \cdot \frac{(1 - \varepsilon_0)^2}{\varepsilon_0^3} \left( \frac{6}{\Psi \cdot d} \right)^2 \dots\dots\dots(2)$$

$$H = \frac{k_1 \cdot v \cdot (1 - \varepsilon_0)^2}{g \cdot \varepsilon_0^3} \cdot \left( \frac{6}{\Psi \cdot d} \right)^2 \cdot V \cdot L + \frac{k_2 (1 - \varepsilon_0)}{g \cdot \varepsilon_0^3} \cdot \left( \frac{6}{\Psi \cdot d} \right) \cdot V^2 \cdot L \dots\dots\dots(3)$$

gdzie:  $k_1 = 150/36$  według Blake-Kozeny lub  $180/36$  wg Kozeny-Carmana,  $k_2 = 1,75/6$ ,  $v$  - kinematyczny współczynnik lepkości,  $V$  - prędkość przepływu wody,  $L$  - wysokość złoża,  $\varepsilon_0$  - porowatość złoża w stanie spoczynku,  $g$  - przyspieszenie ziemskie,  $\Psi$  i  $d$  - sferyczność i średnica ziaren złoża.

Różnica między tymi wzorami polega na dołączeniu do wzoru (2) składnika, kwadratowej zależności strat ciśnienia od prędkości przepływu mającego istotne znaczenie przy wyższych prędkościach.

Istotne znaczenie ma  $\varepsilon_0$ , które w początkowej części cyklu filtracyjnego można przyjąć jako porowatość określana w stanie luźnym, czyli obliczana przy wykorzystaniu gęstości nasypowej. Podczas postępowania procesu filtracji w wyniku osadzania się zanieczyszczeń wielkość ta zmniejsza się, co skutkuje wzrostem strat ciśnienia.

Podczas uruchamiania pompy płucznej i postępującym zwiększaniu się intensywności strumienia płucznego wzrasta siła dynamiczna przepływu, która zsumowana z wyporem zaczyna równoważyć ciężar ziaren złoża. Moment zrównoważenia nazywany jest punktem minimum fluidyzacji, a jest to punkt od którego złożo zaczyna się zachowywać jak ciecz (fluid). Porowatość w tym punkcie  $\varepsilon_{mf}$  jest niewiele większa od porowatości w stanie luźnym  $\varepsilon_0$ . Straty ciśnienia w tym stanie opisuje wzór (4) [5,7]:

$$H_{mf} = \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} (1 - \varepsilon_{mf}) \cdot L_{mf} \dots\dots\dots(4)$$

gdzie:  $\rho_s$  - gęstość ziaren złoża,  $\rho_f$  - gęstość wody,  $L_{mf}$  - wysokość warstwy złoża w stanie minimum fluidyzacji.

Jak widać straty w punkcie minimum fluidyzacji nie zależą od prędkości przepływu wody i od tego punktu każdy dalszy przyrost natężenia przepływu skutkuje wzrostem ekspansji złoża, co w konsekwencji przekłada się na wzrost porowatości, czyli na zwiększanie się przestrzeni, przez które przepływa woda omijając poszczególne ziarna.

Intuicyjnie łatwo wyobrazić sobie, że istnieje związek między porowatością a kształtem ziaren. Ziarna idealnie kuliste i o tej samej średnicy mogą się ułożyć bardzo luźno i wówczas każda kula może mieć 6 punktów stycznych z sąsiednimi. Można obliczyć teoretycznie, że taki układ (kubiczny) ma największą porowatość i wynosi ona 0,476. Podczas zagęszczania czyli przemieszczania wzajemnego kul układ zmienia się do ortorombowego, następnie tetragonalnego aż do rombohedralnego, którego porowatość wynosi 0,2595 [3].

Oczywiście gdy mamy do czynienia z ziarnami złoża pochodzącego z kruszenia skał, a więc w przypadku ziaren o kształtach nieregularnych, które podczas przesiewania nie dają jednorodnej mieszaniny obliczenie teoretyczne porowatości nie jest możliwe. Wówczas jedynym sposobem są badania eksperymentalne.

Badania zachowania się złożeń podczas płukania pozwoliły na wyznaczenie wzorów modelujących zjawiska zachodzące w punkcie minimum fluidyzacji. Istotą jest związanie sferyczności ziaren  $\Psi$  z porowatością  $\varepsilon_{mf}$ . Związek ten określił Narsihman (za [19]) wzorem (5) oraz Wen i Yu [20] wzorami (6).

$$\varepsilon_{mf} = 0,768 - 0,42 \cdot \psi \quad \text{dla } 0,35 < \varepsilon_{mf} < 0,55 \dots\dots\dots(5)$$

$$\frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\psi^2 \cdot \varepsilon_{mf}^3} \approx 11 \quad \text{lub} \quad \frac{1}{\psi \cdot \varepsilon_{mf}^3} \approx 14 \dots\dots\dots(6)$$

Oczywiście wykorzystanie powyższych wzorów nie jest łatwe, gdyż wyznaczenie sferyczności ziaren nieregularnych wymaga pomiarów zaawansowanych technicznie.

Zmiany porowatości podczas płukania, czyli kiedy złożo jest w stanie ekspansji mogą być opisywane przy pomocy wyrażenia wynikającego z bilansu objętości ziaren złoża, które zostało przedstawione wzorem (7).

$$L_0 \cdot (1 - \varepsilon_0) = L_{mf} \cdot (1 - \varepsilon_{mf}) = \dots = L_e \cdot (1 - \varepsilon_e) \dots\dots\dots(7)$$

gdzie  $L_0$  i  $\varepsilon_0$  wysokość i porowatość złoża w stanie spoczynku. Pozostałe oznaczenia są analogiczne tylko z oznaczeniem „mf” w stanie minimum fluidyzacji natomiast z oznaczeniem „e” w dowolnym stanie ekspansji.

Oczywiście konsekwencją równania (7) jest możliwość modyfikacji równania (4) do postaci (8) zawierającej porowatość łatwiejszą do zmierzenia czyli w stanie spoczynku.

$$H_e = \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} (1 - \varepsilon_0) \cdot L_0 \dots\dots\dots(8)$$

Badania procesów ekspansji złoża w funkcji prędkości przepływu wody lub w funkcji liczby Reynoldsa były przedmiotem bardzo wielu opracowań i zróżnicowanych podejść, jednak kanonem, do którego odwołuje się znakomita większość badaczy jest wzór Richardsona i Zaki [14] (9)

$$\frac{V}{V_s} = \varepsilon^n \dots\dots\dots(9)$$

gdzie:  $V$  prędkość przepływu strumienia płucznego,  $V_s$  prędkość sedymentacji niezakłóconej pojedynczego ziarna złoża,  $\varepsilon$  porowatość złoża w stanie wywołanym przepływem wody o prędkości  $V$ , natomiast  $n$  wykładnikiem. Wzór ten został dość dobrze zweryfikowany dla złożeń kulistych, lecz dla złożeń kruszonych o nieregularnych kształtach nie zawsze się dobrze sprawdza. Kluczowa jest tu wartość wykładnika  $n$ , którego sposób obliczania budzi znaczne kontrowersje. W literaturze można znaleźć wiele wzorów pozwalających wyznaczać wartość tego wykładnika zarówno takie, które zostały dostosowane do różnych zakresów liczby Reynoldsa jak i wzory uniwersalne słuszne dla szerokiego zakresu zarówno liczby Reynoldsa jak i Archimedes. [15].

### 3. Metodyka badań

Badane było 8 minerałów to jest antracyt, baryt, chalcedonit, diatomit, klinoptylolit, nevtraco, piasek i proluzyt rozfrakcjonowanych do 10 frakcji przy pomocy sit.

Badania były realizowane dwuczęściowo. Pierwszą stanowiły badania gęstości [9] oraz gęstości objętościowej [12] uwzględniające objętości porów zarówno w poszczególnych ziarenkach, jak i zawartych między tymi ziarenkami [2,8]. Gęstość objętościowa zgodnie z normą [12] powinna być określana dla próbki pobranej w warunkach naturalnych. Naturalny stan próbki jest to stan o nienaruszonej strukturze. W przypadku złóż filtracyjnych naturalny stan jest trudny do określenia, gdyż pod wpływem przepływu wody z góry do dołu, czyli podczas filtracji, złożo zagęszcza się, a z kolei podczas płukania jest unoszone strumieniem wody, rozpulchnia się i po zakończeniu płukania osiada, ale nie tak samo. Układ ziarenek po płukaniu może być zupełnie inny niż przed płukaniem.

Gęstość objętościowa może mieć różne wartości, które będą zależały od stopnia upakowania ziaren. Ze względu na to, badanie gęstości objętościowej było wykonywane dla dwóch skrajnych stanów złóż, to jest stanu luźnego jako gęstość nasypowa i stanu zagęszczonego jaki uzyskiwano w wyniku wibracyjnego zagęszczenia złóż. Gęstość nasypową wyznaczano zgodnie z normą [10,12], z wykorzystaniem cylindrów stalowych i lejków do ciągłego nasypywania złoża. Gęstość objętościową w stanie zagęszczonym wyznaczano za pomocą wymienionych cylindrów i widełek wibracyjnych [6] oraz suwmiarki.

Znajomość gęstości oraz gęstości nasypowej pozwalała na obliczenie porowatości zgodnie ze wzorem (1) [11]. Wzór ten wykorzystywany był do obliczenia porowatości w stanie luźnym podstawiając w miejsce  $\rho_p$  gęstość nasypową oraz porowatości w stanie zagęszczonym, gdy w miejsce  $\rho_{luz}$  wstawiana była wartość  $\rho_{zg}$ , czyli gęstość nasypowa w stanie zagęszczonym.

Ogląd pod mikroskopem oraz wstępne badania gęstości i badania hydrauliczne pozwoliły stwierdzić, że analizowane złoża nie zachowują się jednakowo. Niektóre z nich wykazywały znaczną porowatość wewnętrzną, która była sygnalizowana przez wydobywanie się pęcherzyków powietrza z ziaren zanurzonych w cieczy. Zjawisko to obserwowano zarówno podczas pomiarów gęstości po zalaniu ziaren alkoholem, jak i po nasypianiu ziaren złoża do kolumny filtracyjnej wypełnionej wodą. Każdorazowo konieczne było dość długie oczekiwanie na odgazowanie się ziaren. To zjawisko dotyczyło przede wszystkim diatomitu i klinoptylolitu, a w mniejszym stopniu chalcedonitu, nevtraco i barytu. Ponieważ do badań zjawisk przepływowych podczas przepływu przez złożo - zarówno nieruchome, jak i w stanie fluidyzacji - istotną rolę odgrywa porowatość międzyziarnowa (jamistość), a nie wewnętrzna, należało wyeliminować wpływ porowatości wewnętrznej.

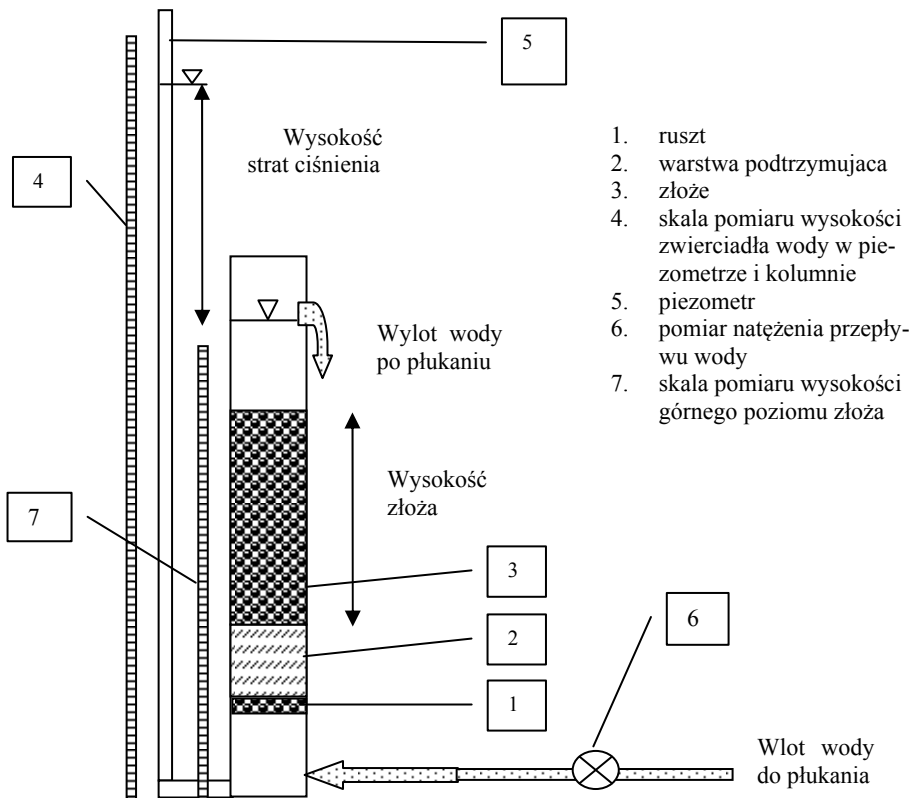
Dodatkowo przeprowadzono eksperyment polegający na zanurzeniu ziaren wszystkich złóż w nafcie o precyzyjnie wyznaczonej gęstości (metodą piknometryczną). Po wypełnieniu porów naftą (po ustaniu wydobywania się pęcherzyków powietrza), ziarna wyjęto na sitko i poddano obcieknięciu. Po obejrzeniu ich pod mikroskopem stwierdzono, że pory wewnętrzne w ziarnach wypełniły się naftą, lecz także na nich utworzył się menisk wypukły, a płaskie powierzchnie były pokryte cienką warstwą nafty. Aby ten nadmiar nafty usunąć, ziarna były delikatnie przetoczone po papierze o średniej chłonności. Końcowym etapem było ważenie ziaren z porami wypełnionymi naftą. Wykorzystując masę ziaren suchych, ziaren nasyconych naftą oraz znając gęstość nafty i gęstość danego minerału, obliczono objętość porów przypadająca, na 1 g złoża (ml/g). Ta informacja pozwoliła na skorygowanie porowatości obliczonej ze wzoru (1) o porowatość wewnętrzną, zgodnie z zależnością

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_p \cdot (1 + v_w \cdot \rho_s)}{\rho_s} \dots\dots\dots(10)$$

gdzie:  $\rho_p$  – gęstość nasypowa [kg/m<sup>3</sup>],  $v_w$  – jednostkowa objętość porów [m<sup>3</sup>/kg],  $\rho_s$  – gęstość minerału [kg/m<sup>3</sup>].

Do dalszych badań i obliczeń była wykorzystywana wartość porowatości wyznaczona dla każdego złoża i każdej frakcji ze wzoru (10).

Druga część badań polegała na pomiarach strat ciśnienia przy przepływie wody przez złożo w stanie nieruchomym oraz strat ciśnienia i ekspansji złoża podczas płukania w stanie fluidalnym. Budowa stanowiska wykorzystywanego do badań został w formie schematycznej pokazana na rys. 1.



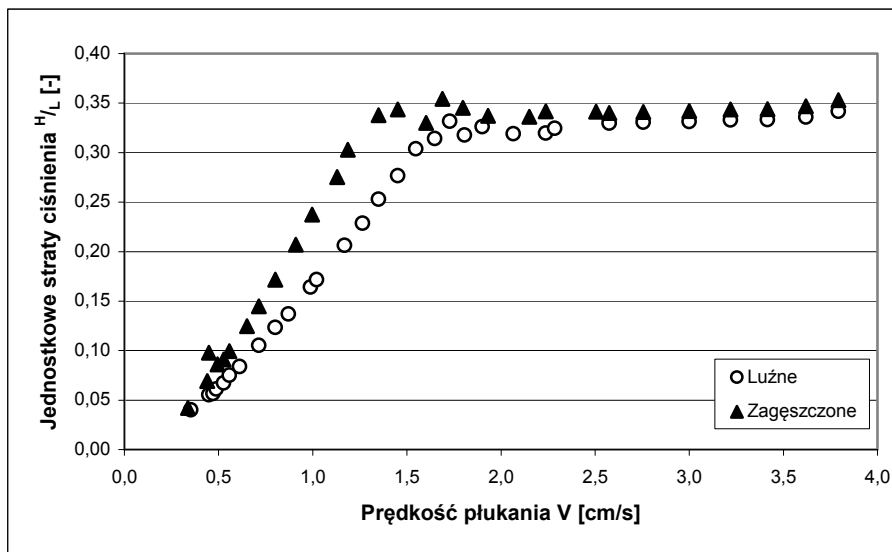
Rys. 1. Schemat stanowiska eksperymentalnego

Fig. 2. Scheme of experimental layout

## 4. Wyniki badań i ich omówienie

### 4.1. Porowatość złoza luźnego i zagęszczonego

Mnogość wyników przy badaniach 8 złożeń w 10 frakcjach umożliwia zaprezentowanie charakterystycznych przypadków i takich, które pokazują istotę typową dla badanych przypadków. Zmiany strat ciśnienia podczas płukania złoza w stanie luźnym i zagęszczonym w stanie spoczynku i stanie ekspansji pokazano na rys. 2.



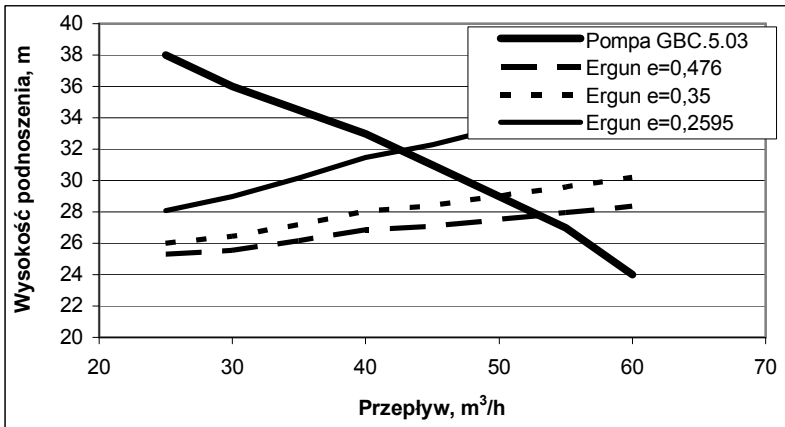
Rys.2. Straty ciśnienia w funkcji prędkości płukania dla złoza antracytowego o granulacji 2,0-3,15 mm z ułożeniem luźnym i zagęszczonym

Fig. 2. Head losses in function of backwashing velocity for anthracite bed with granulation 2,0-3,15 mm with loose and compact arrangement

Jak widać podczas przyrostu prędkości płukania straty ciśnienia w stanie nieruchomym dla obu złożeń (luźnego i zagęszczonego) znacząco się różnią. Rozbieżność ta szczególnie się uwidacznia przy wyższych prędkościach płukania, co jest zgodne z faktem, że straty ciśnienia w funkcji porowatości we wzorach (Kozeny, Erguna) nie są liniowe. Na podkreślenie zasługuje fakt, że w przypadku złoza luźnego nie występuje zwyczaj strat ciśnienia w punkcie minimum fluidyzacji, natomiast jest ona łatwo mierzalna w przypadku złoza zagęszczonego. Jest to zgodne z badaniami Tsinontidesa i Jacksona [17], którzy wykazali istnienie histerezy podczas płukania ze zwiększającą się (złoże zagęszczone) i zmniejszającą (złoże luźne) prędkością przepływu wody. Po

wprawieniu złoża w stan ekspansji funkcje strat ciśnienia pokrywają się, gdyż wówczas porowatość w obu przypadkach staje się identyczna.

Wyniki badań pokazane na rys. 2 uzyskane były podczas przepływu wody z dołu do góry, gdyż wówczas można uchwycić zjawiska przechodzenia złoża w stan fluidalny. W przypadku złoża będącego w stanie nieruchomym te same zjawiska zachodzą podczas przepływu z góry do dołu, czyli mogą być opisane wzorami Kozeny-Carmana i Erguna. Warto przeanalizować na ile stopień zagęszczenia złoża wpływa na zmiany punktu roboczego układu pompa rurociąg złoża w filtrze. Przykładowy przypadek dla piasku kulistego o teoretycznie możliwych porowatościach  $\varepsilon_0=0,476$  oraz  $\varepsilon_0=0,2595$  [3] oraz dla wartości pośredniej pokazano na rys. 3.



Rys.3. Charakterystyka współpracy pompy ze złożem z ziaren kulistych przy różnym stanie zagęszczenia

Fig. 3. Characteristic of pump co-operation with spherical grains bed at different stage of compaction

Jak widać z wykresu (Rys. 3) wpływ zagęszczenia się złoża na pracę systemu zaopatrzenia w wodę może nie być marginalny. W tym przypadku wydajność pompy w wyniku teoretycznie możliwego zagęszczenia złoża zmniejszyła się w stosunku do złoża w stanie luźnym z ok. 53 m<sup>3</sup>/h do ok. 43 m<sup>3</sup>/h. Oczywiście nie jest możliwe oszacowanie uniwersalnego związku odpowiadającego na pytanie, o ile zmniejszy się wydajność układu przy określonym zagęszczeniu złoża, gdyż zależy to także od charakterystyki pompy. W przypadku pomp o charakterystykach stromych będzie nieznaczny, natomiast w przypadku płaskich może być duży.

W warunkach praktycznych trudno osiągnąć te dwie skrajne porowatości, gdyż po zakończeniu płukania złoża samorzutnie, pod wpływem własnego ciężaru zagęszcza się o kilka procent, a z kolei końcowe zagęszczenie dla analizowanych złożów osiągnane było w wyniku działań wibracyjnych, co nie wystąpi w rzeczywistych filtrach. Jednak dla zobrazowania zachowania się różnych złożów w procesie zagęszczenia w tabeli 1 przedstawione zostały średnie wartości stosunku porowatości w stanie zagęszczonym  $\varepsilon_{zg}$  do porowatości w stanie luźnym  $\varepsilon_{luz}$  uzyskanych z badań eksperymentalnych. Wyniki są średnią arytmetyczną uzyskaną z badań każdej z 10 frakcji analizowanych złożów wraz z odchyleniami standardowymi.



W niniejszym artykule nie zostały zamieszczone wyniki ( $\varepsilon_{zg}/\varepsilon_{luz}$ ) dla każdego minerału i każdej z analizowanych frakcji, gdyż jak wykazano stosunek ten praktycznie nie zależy od średnicy ziaren o czym świadczą niskie wartości odchylenia standardowego. Może poza piaskiem, dla którego można było zauważyć niewielki wzrost średniej w funkcji malejących granulacji, a dla pozostałych złóż wartości te były bardzo podobne, a poszczególne stosunki odbiegały od wartości średnich w sposób przypadkowy. Stosunki te mieszczą się w zakresie 0,814 dla piasku do 0,876 dla klinoptylolitu, co jak widać nie daje dużych różnic.

Tab. 1. Zmiany porowatości w wyniku zagęszczania złóż

Tab. 1. Porosity changes as a result of bed compaction

Material	Średnia ( $\varepsilon_{zg}/\varepsilon_{luz}$ )	Odchylenie standardowe	Krotność przyrostu strat ciśnienia
Antracyt	0,854	0,020	2,3
Baryt	0,852	0,008	2,1
Chalcedonit	0,820	0,019	2,5
Diatomit	0,858	0,005	2,0
Klinoptylolit	0,876	0,015	1,9
Nevtraco	0,862	0,004	2,1
Piasek	0,814	0,020	2,4
Piroluzyt	0,837	0,010	2,3

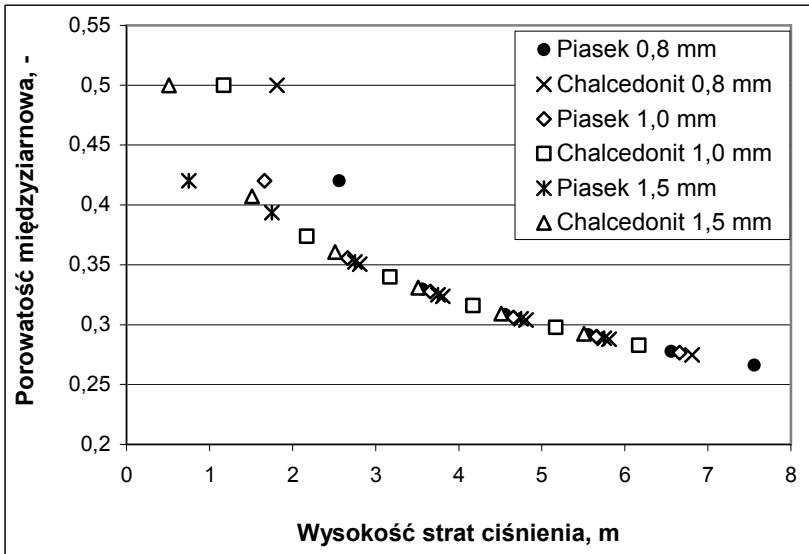
Ostatnia kolumna tabeli 1 pokazuje jak będą zmieniać się straty ciśnienia, gdyby złożo w początkowej chwili było w stanie luźnym i podczas rozpoczęcia filtracji zagęściło się do analizowanego stanu. Porowatość we wzorze Kozeny-Carmana wprowadzona jest przez czynnik  $\frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}$ . Ostatnia kolumna powstała jako stosunek tego czynnika w

stanie zagęszczonym  $\varepsilon_{zg}$  i luźnym  $\varepsilon_{luz}$   $\frac{(1-\varepsilon_{zg})^2}{\varepsilon_{zg}^3} / \frac{(1-\varepsilon_{luz})^2}{\varepsilon_{luz}^3}$ .

Jak widać straty nie są tak marginalne, wzrastają około dwukrotnie. Jednak rzeczywisty stan ubicia się złoża nie będzie tak duży jak ten, który uzyskany był przez zagęszczanie widelkami wibracyjnymi. Obserwacje zachowania się złoża podczas płukania [16] pozwalały stwierdzić, że rzeczywisty stan zagęszczania był dużo niższy i występował z mnożnikiem ok. 0,98, dlatego rzeczywiste przyrosty strat ciśnienia należy szacować na około 10 %.

Znaczące przyrosty porowatości występują podczas procesu filtracji np. odżelaziania. Do wyznaczenia takich wartości należy wykorzystać konkretny przypadek, gdyż nawet przy ustalonych stratach ciśnienia kończących proces filtracji np. 5 m słupa wody zmieniające się w trakcie filtracji natężenie przepływu jest także funkcją rodzaju i

charakterystyki pompy. Na rys. 4 przedstawiono zmienność porowatości w funkcji strat ciśnienia wynikających z odkładania się zanieczyszczeń w przestrzeniach międzyziarnistych. Wykres był konstruowany w taki sposób, że założono porowatość początkową złoża i tak przyjęto porowatość piasku 0,4 natomiast chalcedonitu 0,5. Dalej zakładano kilka wartości strat ciśnienia i dla tych wartości obliczano ze wzoru Kozeny-Carmana porowatość złoża. Przyjęto kilka wartości stałych jak kształt ziaren (piasek  $\Psi = 0,8$ , chalcedonit  $\Psi = 0,56$ ), wysokość złoża 1,2 m oraz zmienne było natężenie przepływu i średnica ziaren złoża 0,8 mm, 1,0 mm i 1,5 mm.



Rys. 4. Porowatość wybranych złożeń w funkcji przyrostu strat ciśnienia w wyniku jego kolmatacji

Fig. 4. Porosity for chosen beds in function of head losses growth as result of colmatage

Jak widać z Rys. 4 osiadanie zanieczyszczeń w przestrzeniach międzyziarnistych wpływa na wzrost strat ciśnienia. Jest to dość oczywiste, lecz na podkreślenie zasługuje fakt zachowania się filtrów przy wysokościach strat ciśnienia o wyższych wartościach np. powyżej 3 m. W tych warunkach punkty bez względu na średnicę ziaren oraz sferyczność układają się wzdłuż wspólnej krzywej. Świadczy to o tym, że przy wyższym stopniu zdeponowania osadów w przestrzeniach międzyziarnistych straty ciśnienia nie zależą od granulacji ziaren oraz ich sferyczności, natomiast zależą jedynie od porowatości. Podczas konstrukcji powyższego wykresu (Rys. 4) wykonano obliczenia także dla piroluzytu, który ma podobną porowatość oraz sferyczność jak chalcedonit. Punkty dla piroluzytu układały się bardzo blisko punktów dla chalcedonitu, co potwierdziło poprzedni wniosek. Na niniejszy wykres nie naniesiono punktów dotyczących piroluzytu, żeby nie zaciemniać obrazu.

## 4.2. Porowatość złoża w stanie minimum fluidyzacji

Porowatość w stanie minimum fluidyzacji, a więc w chwili początkowego wzniesienia zależy w sposób istotny od sferyczności ziaren złoża. W przypadku ziaren o kształtach regularnych jest to łatwe do oszacowania, jednak w rzeczywistości mamy do czynienia ze złożami zbudowanymi z bardzo różnych cząstek o kształtach bardzo nieregularnych np. złoża otrzymywane przez kruszenie skał wydobywanych z ziemi. Można byłoby obliczyć  $\varepsilon_{mf}$  wykorzystując wzory (5), (6) lub (7), lecz na przeszkodzie staje brak znajomości sferyczności  $\psi$ , którą nie da się obliczyć ściśle tylko można ją oszacować wykorzystując pomiary i obliczenia drogą pośrednią [16]. Przy wykorzystaniu przezroczystej kolumny filtracyjnej (wykorzystując stanowisko badawcze, jak na Rys. 1) istnieje możliwość wyznaczenia wysokości złoża w stanie nieruchomym i w początkowym stanie fluidyzacji, a następnie znając porowatość w stanie nieruchomym  $\varepsilon_0$  obliczyć porowatość  $\varepsilon_{mf}$  ze wzoru (8). W tabeli 2 przedstawiono zmiany porowatości odniesionej do porowatości w stanie luźnym i zagęszczonym dla badanych minerałów.

Tab. 2. Relacja między porowatością złożów w stanie luźnym, zagęszczonym i minimum fluidyzacji

Tab. 2. Relationships between porosity of beds with loose, compact arrangement and minimum of fluidization

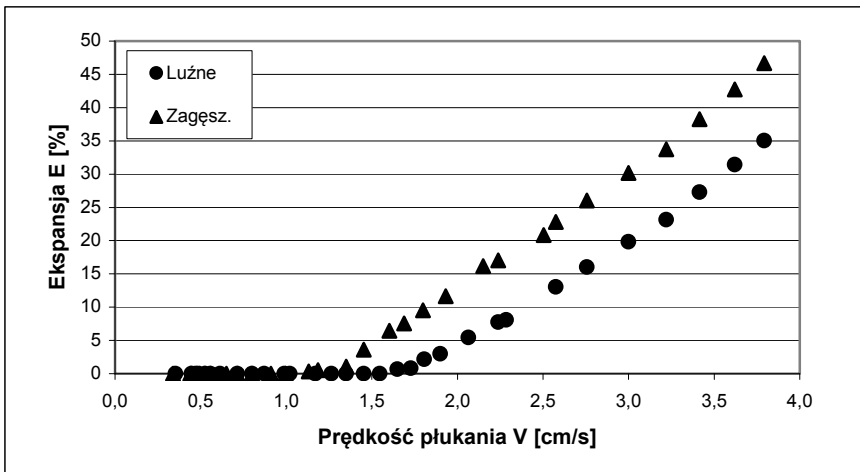
Minerał	$(\varepsilon_{mf} / \varepsilon_{luz})$	odch. stand.	$(\varepsilon_{mf} / \varepsilon_{zg})$	odch. stand.	$\frac{(\varepsilon_{mf} - \varepsilon_{luz}) \cdot 100\%}{\varepsilon_{luz}}$	$\frac{(\varepsilon_{mf} - \varepsilon_{zg}) \cdot 100\%}{\varepsilon_{zg}}$
Antracyt	1,009	0,009	1,140	0,034	0,88	14,03
Baryt	1,013	0,011	1,212	0,025	1,35	21,21
Chalcedonit	1,007	0,013	1,232	0,077	0,75	23,16
Diatomit	1,007	0,012	1,174	0,032	0,67	17,39
Klinoptyloilit	1,009	0,010	1,164	0,056	0,85	16,44
Nevtraco	1,018	0,008	1,178	0,009	1,81	17,84
Piasek	1,013	0,008	1,247	0,041	1,30	24,73
Piroluzyt	1,017	0,017	1,218	0,038	1,66	21,84

Jak widać z tabeli 2 w stanie minimum fluidyzacji obserwuje się bardzo niewielkie wzniesienie złoża w stosunku do stanu luźnego. Zmiany porowatości bez względu na rodzaj złoża nie przekraczają 2%. Zgodnie z oczekiwaniami znacząco większe zmiany odniesione byłyby w stosunku do złoża zagęszczonego i wynoszą dla analizowanych złożów od 14% do 24%. jednak większy sens ma odniesienie przyrostu porowatości w stanie minimum fluidyzacji do porowatości w stanie luźnym, która jest parametrem dużo łatwiejszym do zmierzenia.

### 4.3. Porowatość złoża w stanie ekspansji

Porowatość w stanie ekspansji, czyli podczas płukania jest parametrem zmiennym i zależy od kilku wielkości. Do nich należy zaliczyć gęstość oraz średnicę i kształt ziaren, które przekładają się na ich ciężar pozorny (zmniejszony o wypór) oraz od siły dynamicznej wywołanej prędkością strumienia wody płuczającej. W tym procesie często posługujemy się pomocniczą wielkością, która nazywana jest ekspansją czyli wzniesieniem złoża ponad poziom wynikający ze stanu nieruchomego. Przebieg zmian ekspansji złoża w funkcji prędkości płukania dla przypadku złoża w stanie luźnym i w stanie zagęszczonym przedstawia Rys. 5.

Zagęszczenie uzyskano przez opukiwanie kolumny i obserwowanie zachowania się złoża. Za stan zagęszczony uznano stan, w którym podczas opukiwania złożo przestało się obniżać. Wówczas rozpoczęto pomiary zarówno strat ciśnienia, jak i zmian ekspansji złoża.



Rys. 4. Zależność ekspansji złoża w funkcji prędkości płukania dla złoża antracytowego o granulacji 2,0-3,15 mm z ułożeniem luźnym i zagęszczonym

Fig. 4. Relation between bed expansion and backwashing velocity for anthracite bed with granulation 2,0-3,15 mm with loose and compact arrangement

Jak widać z rys. 4, po zagęszczeniu - wraz ze wzrostem prędkości płukania - obserwowano szybszy wzrost strat ciśnienia niż dla złoża w stanie luźnym. Obliczono, że straty te dla maksymalnego zagęszczenia były o ok. 50% większe, niż dla złoża w stanie luźnym. Te przyrosty strat wynikały ze zmniejszenia się porowatości. Przy maksymalnym zagęszczeniu, a więc, gdy mimo opukiwania kolumny złożo już dalej się nie zagęszczało porowatość zmniejszała się o ok. 9%. Podobnie zmieniała się charakterystyka ekspansji złoża (rys. 4). W tym przypadku obserwowano rozpoczęcie ekspansji złoża zagęszczonego przy mniejszej wartości prędkości płukania niż złoża ułożonego luźno. Krzywe opisujące przyrosty ekspansji są w stosunku do siebie prawie równoległe, gdyż przyrosty są niemal jednakowe. Przesunięcie krzywych ekspansji względem siebie i nie łączenie się w jedną krzywą w

stanie fluidyzacji wynika z innej początkowej wysokości złoża. Obliczenia przyrostów ekspansji, w obu przypadkach odnoszone były do początkowej wysokości złoża, a złoże luźne miało oczywiście wyższą wysokość w chwili rozpoczęcia pomiarów niż złoże zagęszczone. Tsinontides i Jackson [17] zaobserwowali podobne zjawisko histerezy wykonując płukanie złoża przy zwiększającej i zmniejszającej się prędkości płukania.

## 5. Podsumowanie i wnioski

Analiza wykresów i tabel pozwala wyciągnąć następujące wnioski:

- Wykazano analizując zachowanie się 8 minerałów, że zmiany porowatości w wyniku zagęszczania wynoszą od 0,814 dla piasku do 0,876 dla klinoptylolitu, co pozwala na stwierdzenie, że piasek najlepiej się zagęszcza.
- Wykazano także, że podczas osiadania zanieczyszczeń w przestrzeniach między ziarnami, po osiągnięciu przyrostu strat ciśnienia powyżej 3 m dalsze przyrosty nie zależą od średnic ziaren złoża, ich porowatości początkowej ani kształtu ziaren.
- Przyrosty porowatości w punkcie minimum fluidyzacji wynoszą do 2% w stosunku do porowatości w stanie luźnym i 14% do 24 % w stosunku do porowatości w stanie zagęszczonym.

## Bibliografia

- [1] Akgiray O., Saatci A. 2000: A new look at filter backwash hydraulics. IV Międzynarodowa Konferencja „Zaopatrzenie w Wodę, Jakość i Ochrona Wód”, Kraków-Poland 11-13 września.
- [2] Borek S. 2000: Przewodnik do ćwiczeń z gleboznawstwa melioracyjnego. Wyd. SGGW, Warszawa
- [3] Churchill S.W. 1988: Viscous flows. The practical use of theory. Butterworths Series in Chemical Engineering, Boston, London, Singapore, Sydney, Toronto, Wellington
- [4] Fair G.M., Geyer J.C., Okun D.A. 1968: Water and Wastewater Engineering. John Wiley & Sons, Inc. New York
- [5] Heidrich Z., Roman M., Tabernacki J., Zakrzewski J. 1987: Urządzenia do uzdatniania wody. Zasady projektowania i przykłady obliczeń. Arkady, Warszawa
- [6] Kostrzewski W. 2001: Parametry geotechniczne gruntów budowlanych oraz metody ich oznaczania. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań
- [7] Orzechowski Z. 1990: Przepływy dwufazowe. PWN Warszawa
- [8] Pisarczyk S. 2004: Grunty nasypowe. Własności geotechniczne i metody ich badania. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa

- [9] PN-EN 1097-7/2001 – Badanie mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Cz.7. Oznaczanie gęstości wypełniacza. Metoda piknometryczna.
- [10] PN-80/C-04532 – Oznaczanie gęstości nasypowej
- [11] PN-76/06714/09 – Kruszywa mineralne. Badania. Oznaczanie porowatości
- [12] PN-76/B-06714/06 – Kruszywa mineralne. Badania. Oznaczanie gęstości objętościowej w cylindrze pomiarowym.
- [13] PN-89/B-06714.01 – Kruszywa mineralne. Badania. Podział, terminologia.
- [14] Richardson J.F., Zaki W.N. 1954: Sedimentation and fluidization: Part I. Trans. Instn. Chem. Engrs. vol. 32, pp. 35-53
- [15] Siwiec T.: The experimental verification of Richardson-Zaki law on example of selected beds used in water treatment. Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, vol. 10, Issue 2, 2007, Topic Civil Engineering, 5 April. 2007
- [16] Siwiec T.: Warunki płukania jednowarstwowych i dwuwarstwowych filtrów pospiesznych. Wyd. SGGW 2007
- [17] Tsinontides S.C., Jackson R.: The mechanics of gas fluidized beds with an interval of stable fluidization. J. Fluid Mech. vol. 255, 1993, October, pp. 237-274
- [18] Trussell R.R., Chang M.M., Lang J.S., Hodges W.E. Jr. 1999: Estimating the porosity of full-scale anthracite filter bed . Journal AWWA, December, pp. 54-63.
- [19] Wandrasz J., Zieliński J. 1984: Procesy fluidalne utylizacji odpadów. Cz. I, Podstawy teoretyczne, PAN.
- [20] Wen C.Y., Yu Y.H. 1966: Mechanics of fluidization. Chemical Engineering Progress, Symposium Series, 62 (62) pp. 100-111