

Zjawiska, których nie uwzględniano w modelowaniu filtracji

Phenomena that were not included in filtration modelling

WOJCIECH DĄBROWSKI

DOI 10.36119/15.2023.12.19

Opisano sposób przeprowadzenia oraz wyniki eksperymentów świadczących o dużym wpływie na filtrację w głębi takich zjawisk, jak zagęszczanie się w czasie złoża filtracyjnego i ściśliwość osadów pokoagulacyjnych, a także prawdopodobnie pod koniec filtracji inaczej rozumiana niż dotychczas sufozja osadu. Zjawiska te są współodpowiedzialne, wraz z innymi, za brak sukcesów w stosowaniu metod matematycznego modelowania procesu filtracji.
Słowa kluczowe: filtracja, osady pokoagulacyjne, zagęszczanie złoża, sufozja

The method of carrying out and the results of experiments are described, showing a significant impact on depth filtration of phenomena such as the thickening of the filter bed over time and the compressibility of post-coagulation sediments, as well as, probably at the end of filtration, sediment suffusion of a different character than was expected before. These phenomena are co-responsible, together with others, for the lack of success in using methods of mathematical modelling of the filtration process.

Keywords: filtration, coagulation sludge, bed thickening, suffusion

Wstęp

W artykule [12] przedstawiono ogólne matematyczne modele filtracji po-

spiesznej, ale jak stwierdzono żaden z tych modeli nie znalazł praktycznego zastosowania do modelowania filtracji kogoagulowanych zawiesin wodnych, a więc

takich, z którymi mamy do czynienia w technologii wody. W tym artykule omówione zostaną metody badania zjawisk fizycznych towarzyszących przepływowi

prof. dr hab. inż. Wojciech Dąbrowski ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0896-793X> – Politechnika Krakowska, Kraków.

Adres do korespondencji/ Corresponding author: wojciech.dabrowski@pk.edu.pl

takich zawiesin przez złoża filtracyjne, które to zjawiska uniemożliwiają zastosowanie tak prostych metod modelowania w praktyce.

Dobre praktyki

W sytuacji, w której modelowanie matematyczne filtracji pospiesznej wody ma ograniczone zastosowanie szczególnej wagi nabierają badania eksperymentalne. Bardzo powszechnym błędem w publikacjach, w których raportowane są wyniki tych badań jest podawanie jedynie wielkości dawki koagulantu i jego rodzaju, bez co najmniej opisu szybkiego mieszania oraz przynajmniej czasów mieszania wolnego i wielkości gradientu Campa-Steina G w teście stoikowym, a w skali technicznej zarówno w pierwszej jak i drugiej komórce mieszaczy. Gradient G był wielokrotnie krytykowany w literaturze i to od samego początku [9], ale nie wymyślono żadnego równie powszechnie stosowanego parametru charakteryzującego warunki mieszania. Bez podania czasów mieszania i wartości gradientów G nie jest możliwe powtórzenie żadnego doświadczenia dotyczącego koagulacji, flokulacji i filtracji.

Drugą istotną zasadą jest to, że wszystkie prace badawcze powinny bezwzględnie dotyczyć racjonalnie prowadzonych procesów uzdatniania wody [20], [21]. Przykładowo wykazanie, że przy przedawkowaniu koagulantu stwierdzono wystąpienie sufozji w złożu filtracyjnym nie stanowi dowodu na to, że przy racjonalnie prowadzonym procesie uzdatniania sufozja również występuje.

W praktyce technologicznej w ostatnich dekadach stosuje się jako koagulanty wstępnie zhydrolizowane sole metali trójwartościowych. Jednakże w badaniach laboratoryjnych w wielu przypadkach zalecić można stosowanie prostych soli glinu, lub żelaza III, z uwagi na to, że można wówczas łatwo obliczyć poniżej jakiej wartości pH koagulant będzie całkowicie rozpuszczony w zbiorniku roztworowym, a tylko rozpuszczona forma gwarantuje stałe stężenie w zbiorniku, a więc stałą w czasie dawkę koagulantu, co jest warunkiem niezbędnym do uzyskania powtarzalnych wyników.

Kolumny filtracyjne muszą mieć wystarczającą średnicę w odniesieniu do wielkości ziaren złoża filtracyjnego, tak aby efekt brzegowy był zanedbywalnie mały [18]. Znane są metody obliczania tego efektu dla filtracji wgłębnej zawiesin wodnych. Dla złóż drobnoziarnistych średnice kolumn 5 cm są zazwyczaj wystarczające, a średnice 10 cm nawet dla

piasków średnioziarnistych. Znacznie trudniejszym zadaniem jest ustalenie wielkości wymaganego przekroju poprzecznego kolumny, w której badany jest proces płukania złoża filtracyjnego. Wiemy, że w tym przypadku wymagana jest znacznie większa powierzchnia przekroju poprzecznego niż w eksperymentach dotyczących filtracji. Jednak w przeciwieństwie do kolumny filtracyjnej nie dysponujemy modelem matematycznym, który by pozwalał na określenie przy jakiej powierzchni efekt skali jest zanedbywalnie mały. Co więcej w skali technicznej pomimo bardzo dokładnego wypoziomowania krawędzi koryt przelewowych powstają w czasie płukania drogi, wzdłuż których prędkość przepływu jest znacznie większa niż wartość średnia w całym przekroju poprzecznym. Tak więc jeżeli przedmiotem badania jest wielkość ekspansji złoża w funkcji intensywności płukania i temperatury wody to zbyt wielkie powierzchnie przekroju modelu też nie są dobrym rozwiązaniem.

Skala każdego modelu powinna być dobrana nie tylko tak, aby spełnione były wybrane liczby kryterialne, ale również tak by można było pominąć wpływ sił powierzchniowych na warunki przepływu. Przykładowo, przy wysokościach napełnienia mniejszych od trzech centymetrów może dojść do przylegania strumienia wody do ściany poniżej przelewu, co fałszuje wyniki pomiaru.

Pompy powinny służyć wyłącznie do transportu wody/zawiesin wodnych pomiędzy zbiornikami, a różnica wysokości napełnienia w nich decydować o przepływach przez stanowisko badawcze. W przeciwnym przypadku nie da się uniknąć pulsacyjnych przepływów.

Należy umożliwić doregulowywanie urządzeń kontrolujących rozdział przepływów i nie polegać wyłącznie na projekcie stanowiska. Przykładowo, gdy wywiercone z użyciem stojaka do wiertarki otwory w kryzach służą do ustalenia wymaganego odpływu grawitacyjnego, to należy przewidzieć taki rodzaj mocowania kryzy w pionie aby można było na gwincie zmieniać precyzyjnie wysokość położenia kryzy i w ten sposób jak najdokładniej ustalić wielkość odpływu.

Należy mieć na uwadze, że właściwości ziaren filtracyjnych zmieniają się w czasie [10] i że zmiany te muszą być uwzględniane w matematycznym modelowaniu, jeżeli ma się ono odnosić do pracujących przez pewien czas filtrów. Przykładowo, w przypadku sprawdzenia czy filtry z Granulowanym Węgłem Aktywnym płukane tylko wodą wymagają już zastosowania wstępnego płukania powietrzem

konieczne jest przeprowadzenie obliczeń dla aktualnych właściwości złoża [13] i dla aktualnej temperatury wody.

Często dużym problemem jest zapowietrzanie się instalacji badawczej, ale kroki, które należy podjąć aby temu przeciwdziałać zależą od indywidualnych rozwiązań przyjętych na etapie projektowania stanowiska.

Badanie sufozji osadu

P.Korczak [23] pobierał w czasie filtracji próbki zawiesiny ze złoża filtracyjnego przy pomocy kapilar. Okazało się, że w niektórych momentach stężenie zawiesiny wypływającej z kapilar przekraczało stężenie zawiesiny dopływającej do kolumny filtracyjnej [11]. Stanowi to argument przemawiający za występowaniem zjawiska sufozji, ale nie ma pewności, czy koagulacja i flokulacja w złożu filtracyjnym nie były powodem obserwowanego zjawiska.

Metodyka badawcza i rezultat

Inną próbę sprawdzenia czy sufozja ma istotny wpływ na przepływ koagulowanych zawiesin wodnych przez złoża filtracyjne podjęła M.Spaczyńska [8],[17]. Wyniki tych badań nie były publikowane. Doprowadzała ona do kolumny filtracyjnej zawiesinę wodną dwoma przewodami. Procesy koagulacji i flokulacji były prowadzone zawsze tą samą dawką koagulantu i przy tych samych warunkach mieszania. Dla uzyskania dwukrotnie mniejszego stężenia zawiesiny, już po flokulatorze, rozdzielano strumień zawiesiny na dwie równe części, z których jedna płynęła do kolumny filtracyjnej, a druga do kanalizacji. Skonstruowano urządzenie, które 5 centymetrów nad złożem doprowadzało raz 91 strug zawiesiny wodnej, a innym razem 41 strug zawiesiny wodnej i 40 strug czystej wody o tej samej temperaturze. W ten sposób utrzymywano raz dwukrotnie wyższe i raz dwukrotnie niższe stężenie dopływającej zawiesiny, przy tym samym przepływie całkowitym. Gdyby ani flokulacja cząstek stałych zawiesiny w złożu filtracyjnym, ani sufozja zatrzymanego osadu nie miały wpływu na przebieg procesu filtracji, to według opisanych w artykule [12] fenomenologicznych metod modelowania, po dwukrotnie dłuższym czasie przepływu zawiesiny o dwukrotnie mniejszym stężeniu, opory przepływu powinny być identyczne. Gdyby flokulacja odgrywała znaczną rolę, to zgodnie z równaniem Smoluchowskiego należałoby się spodziewać większych oporów

przepływu przy dwukrotnie krótszym czasie i dwukrotnie większym stężeniu zawiesiny. Podobnego efektu spodziewaliśmy się w przypadku wystąpienia sufozji osadu [24]. Tymczasem wyniki były przeciwnie. W wielokrotnie powtarzanym eksperymencie większe opory hydrauliczne przepływu przez kolumnę filtracyjną mierzono po dwukrotnie dłuższym czasie przepływu zawiesiny o dwukrotnie mniejszym stężeniu. Nie znaleziono innego wytłumaczenia tych anomalii jak tylko przyjęcie hipotezy, iż w złożu zachodziła sufozja, ale nie tak jak przyjmował ją Mints [24], iż cząstki fazy stałej w zawieszynie osadzają się i pojedynczo niektóre z nich odrywają. Zamiast tego najprawdopodobniej z zatrzymanego w porach złoża filtracyjnego osadu odrywały się konglomeraty zlepionych po koagulacji cząstek, a wymiary tych konglomeratów były na tyle duże, iż część z nich zatykała zwężenia porów, powodując zwiększenie oporów hydraulicznych przepływu, zamiast spodziewanego zmniejszenia. Tę hipotezę zdają się potwierdzać pomiary wielkości cząstek pobranych przy pomocy kapilar z kolumny filtracyjnej. Według pomiarów spora ich część była większa niż na dopływie do kolumny. W pracy P.Korczaka [11] stężenie objętościowe pobranej ze złoża zawiesiny w niektórych przypadkach było większe niż na dopływie do kolumny. Jednak kapilarny pobór zawiesiny ze złoża może spowodować różnice pomiędzy za-

w przestrzeni 5 cm powyżej powierzchni złoża dochodzi do dalszej flokulacji, a w niektórych przypadkach przeciwnie, do przełamania floków.

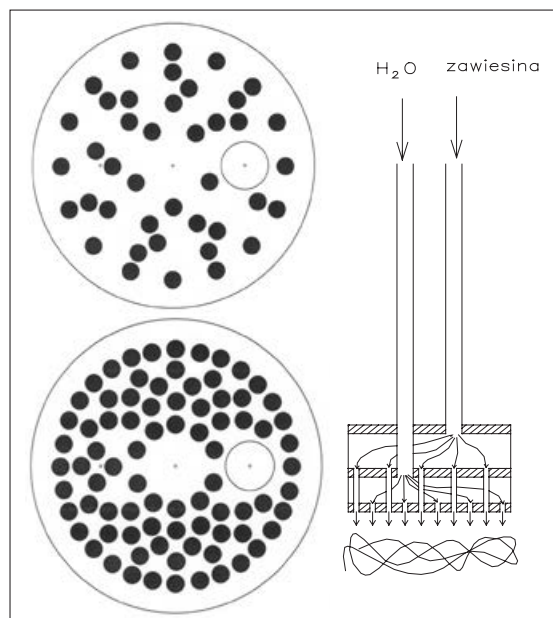
Zagęszczanie złoża filtracyjnego

W literaturze trudno jest znaleźć wzmianki o tym, że w eksperymentach laboratoryjnych po płukaniu dochodzi w czasie do zagęszczania się złoża filtracyjnego, pod wpływem zmieniającego się w czasie gradientu spadku ciśnienia. Nawet pozostawienie po płukaniu kolumny filtracyjnej, bez przepływu, na dobę może skutkować samozagęszczaniem złoża piaskowego o 1% do 2%. Poza T. Siwcem [26] nie znalazłem nigdzie wzmianki na ten temat, a przecież takie zagęszczenie wpływa znacznie na odkładanie się osadów w porach złoża filtracyjnego i na opory hydrauliczne przepływu. Zjawisko to badaliśmy laboratoryjnie [14,15] łącznie z jego wpływem na przyrost w czasie oporów hydraulicznych przepływu. Badany był również wpływ sposobu zamykania przepływu wody płuczonej na całkowitą stratę wysokości ciśnienia w następującym później filtracyklu, zawsze o tej samej długości. Interpretacji poddano średnie wartości z każdej serii pomiarowej obejmującej po trzy filtracykly. Żadne z linii pokazujących straty wysokości ciśnienia w czasie się nie przecinały. Eksperymenty wykazały, że strata wysokości ciśnienia na złożu

zestawienia 144 cm, a dla ekstremalnie powolnego zamykania dopływu wody płuczonej około 160 cm. Tak więc w przypadku oczekiwania 24 h pomiędzy filtracyklami im szybciej zamykany był dopływ wody płuczonej tym mniejsze były opory hydrauliczne przepływu na koniec filtracyklu i w czasie jego trwania.

Metodyka badawcza i rezultat

Płukanie samą wodą jest mało efektywne [1,2,3,4,5], a ono występuje na końcu, po płukaniu najpierw powietrzem, a później mieszaniną powietrza i wody. Chociaż woda popłuczna pod koniec płukania jest czysta (płukanie odbywa się wodą uzdatnioną) to jednak ziarna złoża są jeszcze oblepione nalotami, z których część jest nieusuwalna [10] i zmienia nawet w istotny sposób ciężar właściwy ziaren złoża [19]. Jednak część tych świeżych osadów jest stosunkowo luźno związana z ziarnami i na końcu płukania odrywa się częściowo od ziaren w czasie opadania, gdy dochodzi do ocierania się o siebie. To powoduje złą jakość pierwszego filtratu [6,7,25], a spośród kilku metod zapobiegania temu niekorzystnemu zjawisku ostatnio proponowane jest [1,2] zmniejszenie pod koniec intensywności płukania i prowadzenie go przez pewien czas z intensywnością mniejszą od minimalnej prędkości fluidyzacji. Jednak ten sposób postępowania, korzystny pod względem jakości pierwszego filtratu, może spowodować większą stratyfikację ziaren i przez to skrócenie filtracykli. Aby zbadać czy zjawisko to może zachodzić, na zakończenie płukania wodą zamykano dopływ w sposób ekstremalnie długi [11], znacznie dłuższy niż w zakładach uzdatniania wody. Następnie mierzono stratę wysokości ciśnienia w czasie przyjętego wcześniej czasu filtracykli. Pomiary dotyczyły filtracykli po: odczekaniu doby na samozagęszczanie złoża, bez oczekiwania jakiegokolwiek okresu, po szybkim zamykaniu dopływu wody płuczonej na koniec płukania, po zawsze według tego samego schematu trwającym aż 20 minut zamykaniu dopływu wody płuczonej [22]. Analizowano wartości średnie pomiarów wysokości spadku ciśnienia za każdym razem z trzech eksperymentów prowadzonych w tych samych warunkach. Najlepszą powtarzalność wyników uzyskano przy szybkim zamykaniu dopływu wody płuczonej i rozpoczęciu następnego filtracyklu po odczekaniu 24 godzin od płukania. Dla filtracykli rozpoczynanych po tym odczekaniu najmniejszą stratę wysokości ciśnienia w czasie całego filtracyklu, to



Rys.1
Widok otworów w urządzeniu do doprowadzenia zawiesiny o dwukrotnie większym, a w innych przypadkach wzorcowym stężeniu tuż nad złożo filtracyjne. U góry pokazano otwory w płycie górnej komory urządzenia, a poniżej w płycie dolnej

Fig.1 View of the openings in the device for supplying suspension with twice lower or otherwise the standard concentration just above the filter bed. At the top, the holes in the plate of the upper compartment of the device are shown, and below in the bottom plate

wiesiną rzeczywiście przepływającą przez złożo a tą pobraną i dlatego te przypuszczenia można traktować wyłącznie jako hipotezy. Ponadto nie można wykluczyć, że w wyniku mieszania się strumieni zawiesiny, a innym razem zawiesiny i wody

filtracyjnym na koniec filtracyklu filtru odstawionego po opłukaniu na 24 h: przy szybkim zamykaniu dopływu wody płuczonej wynosiła około 138 cm., dla kończenia płukania wodą z intensywnością poniżej minimalnej prędkości fluidyzacji w przybli-

znaczy po 9 godzinach, uzyskano przy szybkim zamykaniu dopływu wody płucznej (około 148 cm), większą przy płukaniu kończonym z intensywnością poniżej minimalnej prędkości fluidyzacji (w przybliżeniu 144 cm) i największą przy ekstremalnie długim zamykaniu dopływu (około 160 cm). Inaczej przedstawiały się wyniki gdy następny filtrocykl rozpoczynał się bezpośrednio po płukaniu. Na koniec kolejnego filtrocyklu najmniejsza strata wysokości ciśnienia występowała przy kończeniu płukania z intensywnością poniżej minimalnej prędkości fluidyzacji, a przy nagłym i przy ekstremalnie długim czasie zamykania dopływu wody płucznej były one około 20 cm większe. Co ciekawe straty wysokości ciśnienia były większe dla każdego sposobu zamykania dopływu wody płucznej w filtrocyklach prowadzonych zaraz po płukaniu, niż po odczekaniu 24 h. od czasu płukania. Tak długi przestój jest nie do przyjęcia w zakładach uzdatniania wody, ale omawiane tutaj wyniki pokazały jednoznacznie, że większe opory przepływu występują wówczas, gdy złożo zagęszcza się w czasie odkładania się w nim osadów. Zjawisko to nigdy nie było wcześniej badane.

Ścisłość osadów pokoagulacyjnych w filtrze

Próbę zbadania tego zjawiska podjął najpierw w Iowa State University [15,16]. Stanowisko badawcze składało się ze zbiornika wypelnionego zawieszoną kaolinu, naczynia na 5% roztwór siarczanu glinu o pH zapewniającym jego pełną rozpuszczalność, dawkopomiaru koagulantu, flokulatorów na sprężone powietrze, dostępne w laboratorium, zbiornika z przelewem, z którego jeden albo dwa identyczne odpływy zasilały kolumnę filtracyjną ze złożem piaskowym, wyposażoną w liczne punkty do pomiaru wysokości ciśnienia. Po zakończonych filtrocyklach odpływ z kolumny filtracyjnej przekierowywany był do dopływu. W ten sposób przez kolumnę przepływał wielokrotnie czysty roztwór wodny o stężeniu siarczanu glinu równym jego rozpuszczalności. Przepływ zmniejszono dwukrotnie, a po kilkunastu godzinach powracano do większej wartości i po krótkim czasie straty wysokości ciśnienia powracały do pierwotnych wartości. Pomiar wykazał brak wyraźnego wpływu ścisłości osadów pokoagulacyjnych na opory przepływu przez kolumnę filtracyjną [15]. Późniejsze eksperymenty, też prowadzone z recyrkulacją filtratu w laboratorium Politechniki Krakowskiej, wykazały dobrze widoczny

wpływ ścisłości zatrzymanych w kolumnie filtracyjnej osadów na zmiany straty wysokości ciśnienia przy wzroście wartości przepływu przez nią, a obliczenia oparte na modelu kapilarnym złoża wykazywały wzrosty naprężeń ścinających do wartości nie większej niż 4 N/m^2 , w górnej cienkiej warstwie złoża, uznano tę wartość za realną. Obecnie eksperymenty na tym stanowisku prowadzi doktorant M. Nowak i niedługo wyniki będą publikowane.

Podsumowanie

Przedstawione opisy wyników badań eksperymentalnych wskazują, że w czasie filtracji pospiesznej koagulowanych zawiesin wodnych występują w złożu nie tylko spodziewane procesy, takie jak flokulacja, czy sufozja w rozumieniu D.M. Mints [24], ale również zjawiska nieuwzględniane dotychczas w modelowaniu matematycznym filtracji pospiesznej wody, w tym wpływ zagęszczania się złoża w czasie i ścisłość osadów pokoagulacyjnych. Prawdopodobnie pod koniec filtracji zachodzi również sufozja innego rodzaju niż zakładano dotychczas i oparta na odrywaniu się konglomeratów osadu, a nie pojedynczych cząstek.

POWOŁANIA

- [1] Amburgey J.E., Armittharajah A.: Strategic filter backwashing techniques and resulting particle passage, *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, 2005, 4, 535-547
- [2] Amburgey J.E., Brouckaert B.M.: Practical and theoretical guidelines for implementing the extended terminal subfluidization wash (ETSW) back – washing procedure, *AQUA*, 2005, 54, 5, 319-337.
- [3] Amburgey J.E.: Optimization of the extended terminal sub fluidization wash (ETSW) filter backwashing procedure, *Water Research*, 2005, vol. 39, Issue 2-3, January-February, pp. 314-330.
- [4] Armittharajah A. 1993: Optimum backwashing of filters with air scour: a review. *Water Science and Technology*, vol.27, no. 10, pp. 195-211
- [5] Armittharajah A., Cleasby J.L.: Predicting expansion of filters during back – washing, *Journal AWWA*, 1972, January pp. 52-59
- [6] Armittharajah A., Wetstein D.P.: Initial degradation of effluent quality during filtration, *Journal AWWA*, 1980, September pp. 518-524
- [7] Armittharajah A.: The interface between filtration and backwashing. *Water Research*, 1985, vol. 19, no. 5, pp. 581-588.
- [8] Bajer J., Kocwa-Haluch R., Dąbrowska B., Spaczyńska M., Polak U., Sprawozdanie merytoryczne z projektu badawczego nr 4 T09D 038 22, Badanie wpływu sufozji i aglomeracji osadu na proces filtracji pospiesznej wody, Kraków,
- [9] Clarc M.M., Critique of Camp and Stein's RMS velocity gradient, *J. Environ. Eng.*, 1965, 111, 6, 741-754

- [10] Clements M.: Changes in the mechanical behavior of filter media due to biological growth. Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree Doctor Ingenerate in Civil Engineering, Rand Afrikaans University, RPA, Nov. 2004, 150 str.
- [11] Dąbrowski W., Korczak P., Eksploatacja stacji filtrów w aspekcie płukania, *Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej*, Kraków 2008, 184 str.
- [12] Dąbrowski W., Wątpliwości dotyczące modelowania matematycznego filtracji pospiesznej wody, *Instal*, 2023, 12, s.113-116; DOI 10.36119/15.2023.12.19
- [13] Dąbrowski W., Spaczyńska M., Mackie R.I.: A model to predict granular activated carbon backwash curves, *Clean* 2008, 36 (1), 103-110
- [14] Dąbrowski W., Spaczyńska M.: The dependence of filter run period on the very end of filter backwash, *Filtech*, 2005, 11-13 October, vol. 1, 475-481
- [15] Dąbrowski W., 1993, Hydraulic properties of deposit in coarse sand, *Archives of Hydro-Engineering*, Vol.40, No.1/2, 135-158
- [16] Dąbrowski W., Observations of deposit compressibility impact on head losses of flow through granular filter media, *Proceedings of the 2-nd European Conference on Filtration and Separation*, Compagne, France, 2006, October, 12-18, 191-196
- [17] Dąbrowski W., Spaczyńska M., Empirical investigations into the impact of deposit dislodgment on modelling of deep bed filtration, *ibid.*, 104-109
- [18] Grabarczyk C., *Hydromechanika filtrowania wody*, Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, 2010, str.400.
- [19] Guzdek P., *Badania złóż wielowarstwowych stosowanych w filtrach do uzdatniania wody*, praca doktorska, Politechnika Krakowska, 2023
- [20] Kawamura S.: Design and operation of high-rate filters, *Journal AWWA*, 1975, part 1, October, 535-544.
- [21] Kawamura S.: Design and operation of high-rate filters, *Journal AWWA*, 1975, part II, November, 653-662.
- [22] Korczak P., Dąbrowski W., Sposób zamykania dopływu wody płucznej a długość filtrocykli, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 2009, 1, 20-24,
- [23] Korczak P.: *Badania nad płukaniem filtrów pospiesznych wody w celu opracowania metody skracającej okres pogorszonej jakości filtratu*, rozprawa doktorska, Kraków 2008.
- [24] Mints D.M., *Modern theory of filtration. Special Report No.10*, International Water Supply congress, Barcelona, 1966
- [25] Siwiec T., Troińska J.: The influence of backwashing methods on the initial effluent quality during deironing of water, *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*, EJPAU 10(2), 16 str.
- [26] Siwiec T., *Warunki płukania jednowarstwowych i dwuwarstwowych filtrów pospiesznych*, Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2007
- [27] Siwiec T.: The experimental verification of Richardson-Zaki law on example of selected beds used in water treatment, *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*. EJPAU, 10(1), 2007.