

Analiza jakości filtratu z filtrów pospiesznych pracujących z przerwami

Analysis of the filtrate quality from discontinuously operated rapid filters

MICHAŁ ZIELINA

DOI 10.36119/15.2021.6.4

W literaturze można znaleźć doniesienia sugerujące możliwość pogorszenia się jakości filtratu po przerwaniu pracy filtra pospiesznego na kilka godzin i ponownym jego uruchomieniu bez wcześniejszego płukania. W pracy przeanalizowano przyczyny teoretyczne tego zjawiska. Przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych w jednej z krakowskich stacji filtrów. Filtry wyłączano z eksploatacji na kilka godzin dwukrotnie. Po raz pierwszy, w krótkim czasie po płukaniu, gdy złożo było jeszcze w niewielkim stopniu zakolmatowane, a drugi raz, po dłuższym czasie, gdy złożo było już w dużym stopniu wypełnione osadem. Badania wykazały całkowity brak pogorszenia jakości filtratu po pierwszym odłączeniu filtra z eksploatacji. Za drugim razem zaobserwowano przez krótki czas niewielkie pogorszenie efektywności usuwania mętności względem efektywności sprzed wyłączenia filtra. Równocześnie zaobserwowano duże i utrzymujące się przez dłuższy czas spadki efektywności usuwania sumarycznej liczby cząstek i stężenia zawiesiny. Zjawisko to spowodowane było mniejszymi spadkami efektywności usuwania cząstek drobniejszych i większymi, utrzymującymi się dłużej spadkami usuwania cząstek grubszych. Obserwacje wykazały możliwość bezpiecznego odłączania filtrów w niewielkim stopniu zakolmatowanych i ryzyko wyłączenia filtrów w późniejszym okresie eksploatacji.

Słowa kluczowe: filtracja wgłębna, jakość wody, wielkości cząstek

There are reports in the literature suggesting the possibility of a deterioration of the filtrate quality after interrupting the operation of a rapid filter for several hours and restarting it without prior backwash. The theoretical reasons for this phenomenon are analysed in this paper. The results of experimental research at one of Krakow's filter stations are presented. The filters were taken out of operation for a few hours twice. The first time, shortly after backwash, when the bed was still slightly colmated, and the second time, after a longer period of time, when the bed was already largely filled with sludge. The tests showed a complete lack of deterioration of the filtrate quality after the first removal of the filter from service. The second time, a slight deterioration in turbidity removal efficiency was observed for a short period of time compared to the efficiency before the filter was taken out of service. At the same time, large and sustained decreases in the removal efficiency of total particle number and suspended solids concentration were observed. This phenomenon was caused by smaller decreases in the removal efficiency of finer particles and larger, longer lasting decreases in the removal efficiency of coarser particles. The observations showed a possibility of safe disconnection of filters with a small degree of collimation and a risk of disconnection of filters at a later stage of their exploitation.

Keywords: water quality, deep bed filtration, particle sizes

Wprowadzenie

W ostatnich dziesięcioleciach przeprowadzono wiele badań nad nowymi i powszechnie znanymi technologiami oczyszczania wody. W ostatnim czasie zaobserwowano znaczny wzrost stężenia naturalnej materii organicznej w wodach słodkich, a także w ściekach komunalnych. Stąd, wielu badaczy na całym świecie skoncentrowało swoje działania na technologiach uzdatniania wody charakteryzujących się wysoką skutecznością usuwania materii organicznej, takich jak: adsorpcja, filtracja membranowa, utlenia-

nie, biofiltracja, czy koagulacja [1-4]. Nawet jeśli nie zalicza się do nich filtracja wgłębna, to jest to proces niezbędny w całym ciągu technologicznym, który bywa stosowany do wstępnego oczyszczenia wody przed filtrami membranowymi, biologicznymi lub też sorpcyjnymi z węglem aktywnym [5]. Proces filtracji wgłębnej czasami poprzedzony jest flokulacją "in-line", ale najczęściej stosowany jest jako proces główny, redukujący drobne cząstki i kłaczkę pozostałe po flokulacji, a następnie sedymentacji [6]. Istnieje szereg stosowanych materiałów filtracyjnych, takich jak: piasek kwarcowy, antracyt,

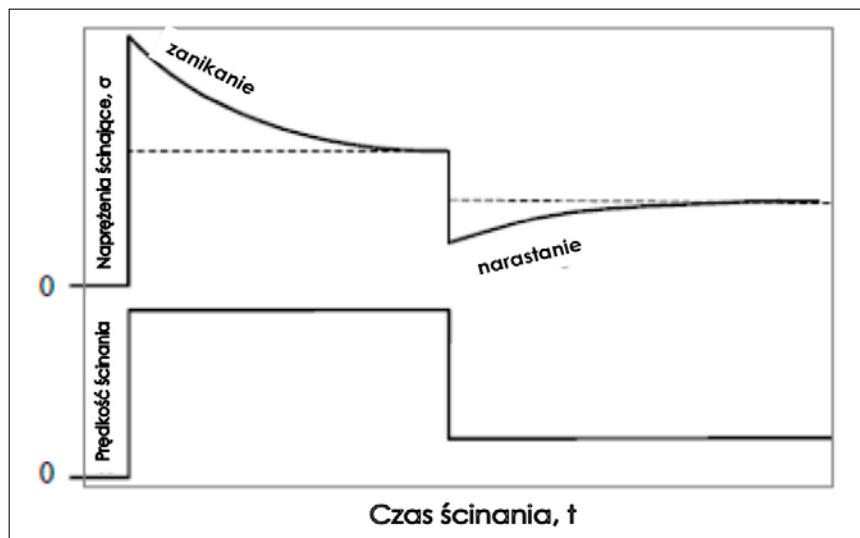
węgiel aktywny, granat, szkło, melafir, zeolit, ziemia okrzemkowa [7,8,9]. Jednak wciąż najpopularniejszym materiałem jednowarstwowym jest piasek kwarcowy, materiałami w konfiguracji dwuwarstwowej antracyt/kwarc, a w konfiguracji trójwarstwowej antracyt/kwarc/granat. Użycie złóż wielowarstwowych pozwala na efektywną pracę filtra, przy wolno przyrastających oporach. To pozwala na rzadsze płukania złoża i tym samym oszczędność energii zużywanej na ten cel. Jednak długie okresy bez płukania wymagają szczególnej kontroli filtratu, w celu uniknięcia pogorszenia jego jakości. Stąd, dość

Dr hab. inż. Michał Zielina, prof. PK, <https://orcid.org/0000-0001-7710-8982> – Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków. Adres do korespondencji/Corresponding Author: michal.zielina@pk.edu.pl

powszechnie w krajach rozwiniętych prowadzony jest pomiar on-line jakości filtratu. Niestety, zazwyczaj pomiar ten jest prowadzony tylko na odpływie zbiorczym z całej stacji filtrów, a nie na odpływach z poszczególnych filtrów. Rzadko też oprócz pomiaru mętności dokonywany jest pomiar liczby cząstek w poszczególnych grupach wielkości [10,11,12]. Pozwoliłoby to precyzyjnie ustalić optymalny moment płukania, który powinien pojawić się tuż przed pogorszeniem się jakości filtratu. Pogorszenie to wywołane jest rosnącą prędkością, a co za tym idzie rosnącymi naprężeniami ścinającymi w porach złoża. Przy czym, zazwyczaj najpierw obserwowany jest przyrost grubszych cząstek lub kłaczków w filtracie, a dopiero później tych drobniejszych [12,13]. Sam pomiar mętności może nie wykazać spadku sprawności usuwania cząstek z jednej grupy wielkości, która może mieć miejsce po przekroczeniu określonego stopnia kolmatacji lub też być wywołana nagłymi zmianami prędkości filtracji. Jak wykazano [12] na wynik pomiaru mętności wpływ mają głównie rozproszone w wodzie cząstki o wielkościach poniżej 2 mikrometrów i wpływ ten maleje wraz ze wzrostem wielkości cząstek. Można się więc spodziewać, że zmiana ilości cząstek o wielkościach powyżej 10 mikrometrów może mieć znikomy wpływ na pomiar mętności.

Zmiana prędkości filtracji może mieć miejsce podczas wyłączenia i włączenia filtrów w trakcie jego eksploatacji pomiędzy płukaniem, co może powodować nagły wzrost i spadek naprężenia ścinającego wewnątrz kapilar złoża na granicy przepływającej wody i zatrzymanego osadu. Jak wykazano w pracach [14,15] podczas badań laboratoryjnych na osadzie, a więc cieczy nienewtonowskiej plastycznej, nagły wzrost prędkości ścinającej w reometrze spowodował nagły wzrost naprężenia ścinającego przekraczający te, które pojawiłyby się przy tej samej prędkości ścinania, ale przy ustabilizowanej pracy filtra. Utrzymując następnie stałą prędkość ścinania naprężenie ścinające stopniowo malało do osiągnięcia stałej wartości. Schematyczny przebieg zmian naprężenia ścinającego w cieczy tiksotropowej zaprezentowany w pracy [14] przedstawiono na rysunku 1.

Przerywanie pracy filtrów w godzinach szczytu, gdy ceny prądu są najwyższe, pozwala na obniżenie kosztów produkcji wody. Zgodnie z opisanymi w literaturze obserwacjami eksperymentalnymi przy zastosowaniu reometru, również w skali technicznej w filtrach przy ponownym włączeniu filtra można spodziewać



Rys. 1.

Zachowanie się cieczy tiksotropowej, początkowo w stanie spoczynku, a następnie poddanej działaniu dużej prędkości ścinania, po której następuje obniżenie tej prędkości [14].

Fig. 1. Behavior of thixotropic liquid, initially at rest, and then subjected to a high shear rate followed by a lower shear rate [14].

Tabela 1. Uziarnienie złoża filtracyjnego
Table 1. Filter media grain size

material złoża	piasek kwarcowy			antracyt		
Średnica ziaren [mm]	0,5 - 0,63	0,63 - 0,8	0,8 - 1,0	0,9 - 1,1	1,1 - 1,3	1,3 - 1,5
Wysokość warstwy piasku [cm]	10	23	17	15	20	15

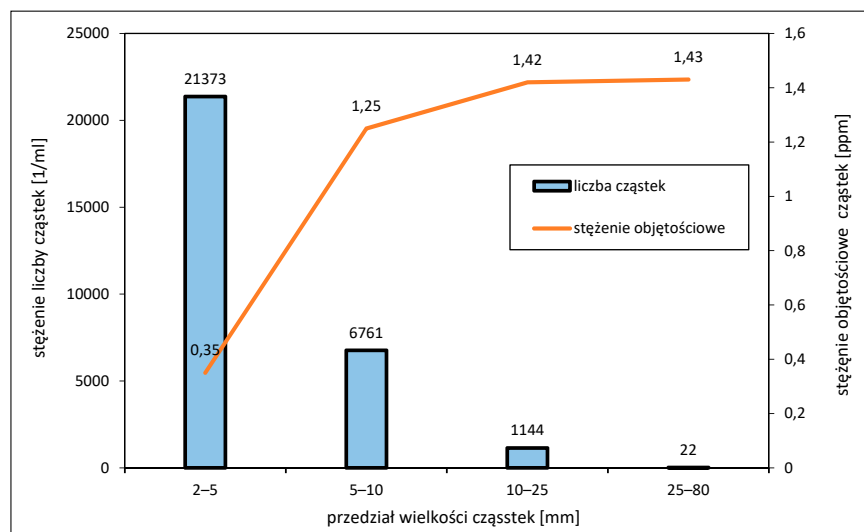
wzrostu naprężenia ścinającego do wartości znacznie przekraczających wartości osiągnięte przy ustabilizowanej pracy filtra. Można też spodziewać się, iż spadek naprężenia ścinającego do wartości osiągniętej w warunkach stabilnych może trwać przez długi czas po włączeniu filtra. Konieczne jest, więc sprawdzenie, czy postoje filtrów podczas eksploatacji mają wpływ na jakość produkowanego filtratu, a jeżeli tak to jak duży jest ten wpływ. Wykazanie, że postoje w godzinach szczytu, gdy taryfa jest najdroższa nie wpływają na pogorszenie jakości filtratu oznaczałoby, że stosowanie takiego sposobu eksploatacji filtrów w przypadkach, gdy jest to technicznie możliwe, mogłoby być rekomendowaną metodą. Jeżeli jednak pojawiłoby się znaczne pogorszenie jakości filtratu po ponownym włączeniu filtra do pracy, działanie takie byłoby nie-rekomendowane, albo wymagało szczególnej ostrożności.

Metodyka badań

Badania eksperymentalne przeprowadzono w zakładzie uzdatniania wody ujmującym wodę z jeziora Dobczyckiego na rzece Rabe dla miasta Krakowa. Ujmowana woda na wstępie poddawana jest procesowi ozonowania. Następnie do wody dozowany jest węgiel aktywny w postaci pulpy węglowej oraz koagulant. Tak przygotowana woda jest rozdzielana

na dwa osobne ciągi technologiczne zwane Raba I i Raba II. Badania przeprowadzono na filtrze pospiesznym znajdującym się w ciągu technologicznym Raba I. W ciągu technologicznym Raba I woda po przepłynięciu przez komorę szybkiego mieszania jest rozdzielana na 12 komór wirowych, skąd trafia do osadników poziomych, następnie do stacji filtrów pospiesznych. Dodatkowo do wody dopływającej korytem do filtrów dozowane jest mleko wapienne. Badania opisane w artykule przeprowadzono na jednym z filtrów pospiesznych znajdujących się w ciągu technologicznym Raba I. Dopływ wody do badanego filtra znajdował się powyżej zwierciadła wody nad złożem. Poziom wody na filtrze był mierzony przy pomocy sondy ultradźwiękowej, natomiast ciśnienie na wypływie rejestrował czujnik firmy Aplisens. Przepływ przez filtr wyznaczany był dla zmierzonego poziomu wody w korycie dopływowym. Badany filtr pospieszny wypełniony był złożem dwuwarstwowym. Dolna warstwa składała się z piasku kwarcowego, a górna z antracytu. Całkowita wysokość złoża wynosiła 100 cm. Uziarnienie poszczególnych warstw złoża przedstawiono w tabeli 1. Porowatość warstwy „czystego” złoża kwarcowego wynosiła 0,41, a antracytowego 0,56.

W trakcie prowadzenia pomiarów eksperymentalnych prędkość filtracji w badanym filtrze utrzymywała się na



Rys. 2. Średni rozkład wielkości cząstek w dopływie do filtra podczas eksperymentów.
Fig. 2. Average particle size distribution in the inflow to the filter during experiments.

poziomie 2,32 m/h przy średniej temperaturze wody wynoszącej 12,2 C°.

Średnia mętność wody dopływającej do filtra wynosiła 7 NTU, średnie stężenie zawiesiny około 4,7 ppm, średnia wartość odczynu pH = 7,9, oporność wody 0,23 mS/c, potencjał elektrokinetyczny zeta (-13,5 mV) przy podanym odczynie pH i oporności. Średnie stężenia liczby oraz objętości cząstek z poszczególnych przedziałów wielkości w zawieszynie dopływającej do filtra przedstawiono graficznie na rysunku 2.

Pomiary stężeń liczby cząstek w poszczególnych przedziałach przeprowadzono na spektrometrycznym liczniku cząstek Liquilaz E20 firmy Particle Size Measurement. Pomiar mętności nefelometrycznej dokonano przy pomocy mętnościomierza firmy WTW - Turb 555 IR, natomiast potencjał elektrokinetyczny dzeta zmierzono przy pomocy instrumentu Zetasizer firmy Malvern Insrumetns.

Dzięki grubemu uziarnieniu górnej warstwy złoża filtracyjnego, podczas eksperymentów wyeliminowano niepożądane zjawisko cedzenia.

Wyniki

Badanie eksperymentalne przeprowadzono na jednym z filtrów pospiesznych pracujących w zakładzie uzdatniania wody ze zbiornika Dobczyckiego. Metodę prowadzenia badań oraz szczegóły dotyczące uziarnienia złoża i warunków eksploatacji filtra opisano we wcześniejszym rozdziale. Pracę filtra monitorowano od momentu zaraz po jego płukaniu aż do momentu kolejnego płukania. Cały filtracyk trwał prawie 90 godzin, a więc prawie 4 dni. Tak długi okres eksploatacji filtra

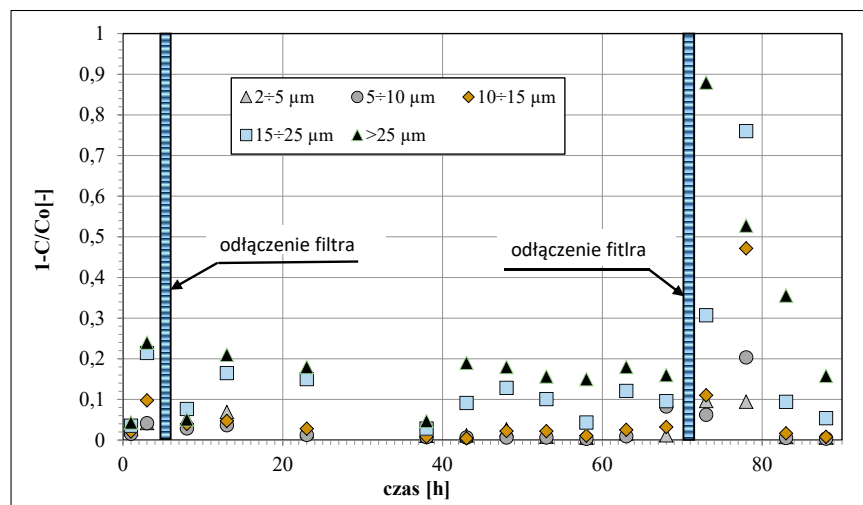
bez płukania był możliwy dzięki zastosowaniu złoża dwuwarstwowego oraz relatywnie niskiej mętności wody dopływającej. W trakcie trwania filtracyklu filtr dwukrotnie odłączano od zasilania wodą na około 3 godziny, za każdym razem i po tym czasie ponownie podłączano go do eksploatacji bez wcześniejszego płukania. Po raz pierwszy filtr odstawiono od eksploatacji po około 4 godzinach od rozpoczęcia badań, a więc krótko po jego płukaniu. Ilość osadów, które odłożyły się w porach złoża była więc wtedy na bardzo niskim poziomie. Po raz drugi filtr został odstawiony po długim czasie eksploatacji bez płukania tzn. po 69 godzinach, gdy filtr był już silnie zakolmatowany.

W trakcie badań pobierano próbki na dopływie i odpływie do/z filtra pospiesznego i dokonywano pomiarów m.in. mętności oraz stężeń liczby cząstek. Pobory próbek dokonywano w cyklu 5 godzin-

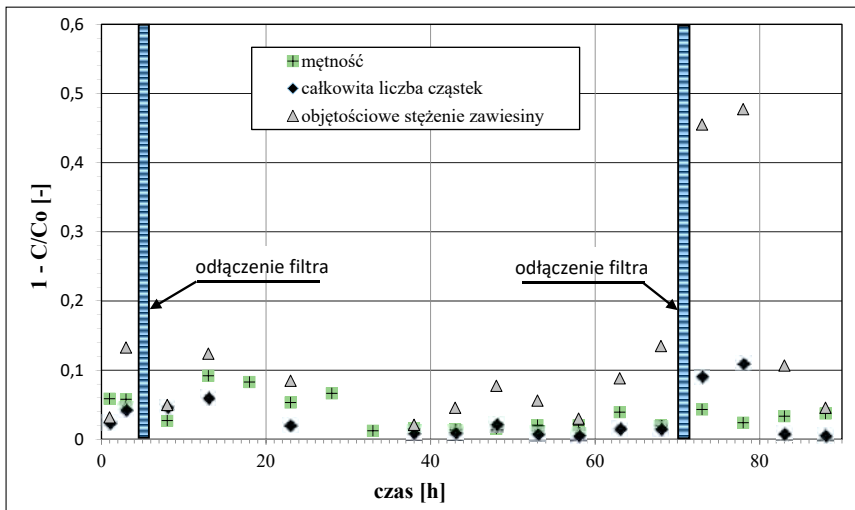
nym, z wyłączeniem jednej dłuższej nocnej przerwy. W oparciu o przeprowadzone pomiary wyznaczono mętności pozostałe w odpływie z filtra w stosunku do mętności w dopływie, a także pozostałe w filtracji objętościowe stężenia zawiesiny, pozostałe stężenia sumarycznej liczby cząstek oraz pozostałe stężenia liczby cząstek z poszczególnych grup wielkości w stosunku do tychże parametrów w dopływie do filtra. Wielkości te wyznaczono ze wzoru matematycznego $1 - (C:C_0)$, gdzie C - odpowiednio zmierzona mętność lub zmierzone stężenie liczby cząstek lub zmierzone objętościowe stężenie cząstek w odpływie z filtra, a C_0 - odpowiednio zmierzona mętność lub zmierzone stężenie liczby cząstek lub zmierzone objętościowe stężenie cząstek w dopływie do filtra.

Wyniki pomiarów stężeń liczby pozostałych w odpływie cząstek z poszczególnych grup wielkości w stosunku do wartości w dopływie przedstawiono na rysunku 3. Natomiast, pozostałe mętności, stężenie sumarycznej liczby cząstek i objętościowe stężenie zawiesiny w odpływie w stosunku do tychże parametrów w dopływie do filtra przedstawiono na rysunku 4.

Przebiegi redukcji mętności i stężeń zawiesiny w filtrze przedstawione na rysunku 4 wskazują generalnie na dużą efektywność jego działania. Stopień redukcji mętności przez większość czasu pracy filtra utrzymywał się na poziomie znacząco przekraczającym 90%. Oznaczało to, że mętność w wypływie z filtra była dużo niższa niż minimalna dopuszczalna wartość mętności w wodzie do spożycia, która wynosi 1NTU. Na nieznacznie wyższym poziomie, choć bardzo zbliżonym do poziomu stopnia redukcji mętności, utrzymywał się stopień redukcji



Rys. 3. Udział pozostałych cząstek z poszczególnych grup wielkości w filtracji.
Fig. 3. Share of remaining particles of each size group in the filtrate.



Rys. 4. Udział pozostałych w filtracie mętności, całkowitej liczby cząstek i objętościowego stężenia zawiesiny. Fig. 4. Share of remaining turbidity, total particle number and volumetric suspension concentration in the filtrate.

sumarycznej liczby dopływających do filtra cząstek rozproszonych w zawieszynie. Podobnie też było w przypadku redukcji stężenia zawiesiny, którego efektywność była z kolei nieznacznie niższa, jednak zbliżona do stopnia redukcji mętności.

Z porównania wyników przedstawionych na rysunkach 3 i 4 widać, że efektywność usuwania sumarycznej liczby cząstek jest przez większość czasu pracy filtra podobna do efektywności usuwania cząstek drobniejszych na filtrze. Można to łatwo wytłumaczyć dużym liczbowym udziałem drobniejszych cząstek w zawieszynie. Z kolei, redukcja objętościowego stężenia zawiesiny w filtrze jest zbliżona do redukcji cząstek grubszych, co wynika z większego objętościowego udziału grubszych cząstek w zawieszynie.

W trakcie prowadzenia badań filtr był dwukrotnie odstawiany od pracy. Po raz pierwszy w krótkim czasie po jego płukaniu już po 4 godzinach, gdy stopień jego zakolmatowania był jeszcze na bardzo niskim poziomie. Natomiast, drugi raz był wyłączony z pracy po 69 godzinach eksploatacji bez płukania, gdy ilość odłożonego w porach złoża osadu była już bardzo duża. Na rysunkach 3 i 4 zaznaczono okresy, w których filtr był wyłączany z pracy. Po odłączeniu filtra z pracy za pierwszym razem, gdy pory złoża tylko w niewielkim stopniu wypełnione były osadem, albo wręcz osad jeszcze nie zdążył się odłożyć, na rysunkach 3 i 4 można zaobserwować brak wpływu odłączenia filtra przez kilka godzin na jego efektywność oczyszczania. Stopień redukcji mętności, stężenia zawiesiny oraz sumarycznej liczby cząstek, a także liczby cząstek w poszczególnych grupach wielkości były praktycznie na tym samym poziomie na

jakim były przed odłączeniem filtra. Natomiast zupełnie inne obserwacje zanotowano po ponownym włączeniu tego samego filtra do pracy po kilkugodzinnej przerwie za drugim razem, gdy pory jego złoża były już znacząco zakolmatowane po wielogodzinnej wcześniejszej eksploatacji bez płukania. Zaobserwowano wtedy znaczące pogorszenie efektywności usuwania wszystkich badanych parametrów: stężenia zawiesiny, mętności, a także sumarycznej liczby cząstek i cząstek z poszczególnych grup wielkości. Przy czym efektywność usuwania cząstek grubszych i stężenia zawiesiny uległa obniżeniu w większym stopniu i trwała dłuższy czas po włączeniu filtra, a spadek efektywności usuwania mętności i cząstek drobniejszych był o wiele mniejszy i trwał krócej.

Brak wpływu wyłączenia na kilka godzin i ponownego włączenia filtra nieznacznie zakolmatowanego na jakość produkowanego filtratu oraz wyraźny wpływ takiego działania na jakość filtratu, w przypadku gdy złoża było już silnie zakolmatowane, świadczy o istotnym wpływie osadu zgromadzonego w porach złoża na spadek efektywności usuwania cząstek w filtrze lub też pojawienie się wewnątrz zjawiska sufozji.

Włączenie filtra po okresie przestoju spowodowało nagły wzrost prędkości przepływu wewnątrz kanałków złoża, czemu towarzyszył gwałtowny znaczący wzrost naprężeń ścinających, wyższy od tych, które obserwowalibyśmy podczas pracy filtra bez jego okresowego odstawiania. Wynikało to z faktu, iż pory złoża wypełnione były osadem pokoagulacyjnym, który zachowywał się jak ciecz tiksotropowa. Po nagłym wzroście prędkości naprężenie ścinające na granicy osad

woda wzrosło powyżej wartości, które można było zaobserwować przed odłączeniem filtra przy stabilnie utrzymanej prędkości. Stopniowo po włączeniu filtra do ponownej eksploatacji przy zachowaniu stałej prędkości przepływu, naprężenie ścinające malało do poziomu sprzed odłączenia filtra. Takim zmianom naprężenia ścinającego wewnątrz złoża po ponownym włączeniu silnie zakolmatowanego filtra do pracy towarzyszyły, początkowo znaczący spadek efektywności zatrzymywania cząstek w złożu oraz zjawisko sufozji związane z odrywaniem się wcześniej zatrzymanych cząstek w formie osadu, a następnie stopniowy powrót do poziomu sprawności pracy filtra przed jego odstawieniem.

Skutkowało to znacznym spadkiem usuwania mętności, stężenia zawiesiny i cząstek zaraz po ponownym włączeniu filtra do pracy względem efektywności ich usuwania przed wyłączeniem filtra, mimo iż prędkość filtracji była taka sama. Stopniowo efektywność redukcji poszczególnych parametrów poprawiała się, aż do osiągnięcia tych sprzed odstawienia filtra. Po 10 godzinach od ponownego włączenia do pracy zakolmatowanego filtra wszystkie parametry opisujące jakość filtratu, oprócz liczby najgrubszych cząstek, powróciły do poziomu sprzed odstawienia filtra. Zazwyczaj, w przypadku wzrostu prędkości przepływu w kanałkach zakolmatowanego osrodka porowatego obserwuje się najpierw odrywanie cząstek najgrubszych i spadek ich efektywności zatrzymywania, a później dopiero tych drobniejszych. Tłumaczy to największy i najdłużej utrzymujący się wzrost liczby najgrubszych cząstek w filtracie po nagłym włączeniu silnie zakolmatowanego filtra oraz objętościowego stężenia zawiesiny. Tłumaczy to również obserwowane, w mniejszym stopniu i przez krótszy czas po ponownym włączeniu filtra silnie zakolmatowanego, spadki redukcji liczby cząstek najdrobniejszych, a co za tym idzie też mętności.

Wnioski

- Obserwacje wskazują, iż odłączenie silnie zakolmatowanego filtra na kilka godzin i ponowne jego uruchomienie może spowodować wyraźne pogorszenie jakości filtratu przez pewien okres.
- Po ponownym włączeniu zakolmatowanego filtra do eksploatacji zaobserwowano większy i dłużej trwający spadek efektywności usuwania grubszych cząstek, a mniejszy i krótszy cząstek drobniejszych.
- Zaobserwowano znaczny spadek

- jakości filtratu zaraz po włączeniu zakolmatowanego filtra do eksploatacji i powolną stopniową poprawę jakości filtratu, która pozwoliła dopiero po kilku godzinach uzyskać wcześniejszy poziom liczby cząstek najdrobniejszych w filtracji, a cząstek grubszych dopiero po kilkunastu godzinach.
- Spadek efektywności usuwania cząstek po ponownym włączeniu do eksploatacji zakolmatowanego filtra był trudny do zidentyfikowania w oparciu o pomiar mętności, ale wyraźnie zidentyfikowalny poprzez pomiar objętościowego stężenia zawiesiny, ale również sumarycznej liczby cząstek.
 - Wyłączenie na kilka godzin filtra w niewielkim stopniu zakolmatowanego po ponownym jego włączeniu do pracy nie spowodowało pogorszenia jakości filtratu.
 - Wpływ na pogorszenie jakości filtratu po wyłączeniu zakolmatowanego filtra na kilka godzin i ponownym włączeniu go do eksploatacji miał znaczny wzrost naprężenia ścinającego wewnątrz kapilar, które stopniowo malało aż do osiągnięcia po wielu godzinach poziomu sprzed odstawienia filtra.
 - Zmiany naprężenia ścinającego wewnątrz kapilar zakolmatowanego filtra po ponownym włączeniu go do pracy wynikały z właściwości osadu jako cieczy tiksotropowej wywołując sufozję zgromadzonego w kapilarach osadu oraz spadek skuteczności zatrzymywania cząstek, szczególnie tych grubszych.
 - Odstawianie filtra po dłuższej eksploatacji i ponowne jego włączenie bez płukania nie jest rekomendowane lub powinno być przeprowadzane z bardzo dużą ostrożnością.

LITERATURA

- [1] Sillanpää, M. Ncibi, M.C. Matilainen, A. Vepsäläinen, M. Removal of natural organic matter in drinking water treatment by coagulation: A comprehensive review. *Chemosphere*, 2018, 190, 54-71 [doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.09.113].
- [2] Pietrzyk, A. Papciak, D. The effectiveness of organic matter removal in unit processes of the technological groundwater treatment system. *E3S Web of Conferences*, 2018, 44, 00142 [doi: org/10.1051/e3sconf/20184400142].
- [3] Domoń, A. Papciak, D. Tchórzewska-Cieślak, B. Pietrucha-Urbaniak, K. Biostability of tap water - A qualitative analysis of health risk in the example of groundwater treatment (Semi-Technical Scale). *Water*, 2018, 10(12), 1764 [doi: org/10.3390/w10121764].
- [4] Mroczko, D. Zimoch, I. The use of Zeta Potential Measurement as a Control Tool of Surface Water Coagulation, *Journal of Ecological Engineering*,

- 2020, 21 (3), 237-242 [doi: org/10.12911/22998993/118273].
- [5] Uragami, T. *Science and Technology of Separation Membranes*, Wiley & Sons Ltd., 2017 [DOI:10.1002/9781118932551].
- [6] Hendricks D. *Fundamentals of Water Treatment Unit Processes: Physical, chemical and biological*, Taylor and Francis Group, 2011 [doi: org/10.1201/9781439895092].
- [7] Michel, M.M. Siwiec, T. Reczek, L. Duda, C. Removing aggressive carbon dioxide from water using melaphyre bed, *Journal of Ecological Engineering*, 2017, 18(5), 186-191 [DOI: 10.12911/22998993/76212].
- [8] Logsdon, G.S. Hess, A. Chipps, M.J. Rachwal, A.J. *Filter Maintenance and Operations Guidance Manual*, UK, American Water Works Association, 2002.
- [9] Siwiec, T. *Warunki płukania jednowarstwowych i dwuwarstwowych filtrów pospiesznych*, Warszawa, SGGW, 2007.
- [10] Zielina, M. Particle Shapes in the Drinking Water Filtration Process, *Clean – Soil, Air, Water*, 2011, 39(11), 941-946 [doi.org/10.1002/clen.201000432].
- [11] Zielina, M. Próby interpretacji pomiarów mętności w wodzie uzdatnianej, *Gaz Woda i technika Sanitarna*, 2007, 54(02).
- [12] Zielina, M. Monitoring particle size distribution for water treatment processes, *Environment Protection Engineering*, 2016, 42(3), 167-177 [DOI 10.5277/epe160313].
- [13] Tien, C. Ramarao B.V. *Granular Filtration of Aerosols and Hydrosols 2nd Edition*, Elsevier Science, 2007.
- [14] Barnes, H.A. *A handbook of elementary rheology*, GB, University of Wales, 2000
- [15] Barnes, H.A. Thixotropy—a review, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 1997, 70 (1-2), 1-33.