Michał ZIELINA

Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska Politechnika Krakowska

WYKORZYSTANIE LICZNIKÓW CZĄSTEK W MODELOWANIU FILTRACJI POSPIESZNEJ

PARTICLE COUNTERS APPLICATION FOR THE RAPID FILTRATION MODELING

Today, rapid filter efficiency is usually controlled by turbidity meters. Turbidity is a practical parameter that is possible measure accurately and continuously. However, in the United States particle counters are sometimes additionally used in filter plants. The potential application of particle counters for rapid filtration was analyzed by several scientists. The common information from more expensive particle counters can also be obtained from turbidity meters. Only for some filtration conditions -- like very low suspension concentration or a high quantity of coarser particles -- were particle counters significantly more benficial. Particle counters seem to be very useful for the development of depth filtration mathematical modeling in practice. A significant influence of particle size distribution on rapid filtration has been proven by many scientists. Consequently, different kinetic equations should be used for each particle size group in suspension. Describing the filtration process only by analysis of total suspension concentration while omitting the particle size distribution results in mistakes in mathematical models. Using turbidity as a surrogate for suspension concentration creates more significant mistakes in mathematical modeling. Removal efficiency based on turbidity is much lower than based on suspension concentration when the removal of coarser particles is better than removal of finer particles. Earlier deterioration of the removal of coarser particles is often not detected by turbidity. Particle counting describes the rapid filtration process much more precisely than turbidity. Particle counters increase the possibility of the practical application of mathematical models.

1. Zastosowanie liczników cząstek w filtracji pospiesznej

Stały monitoring filtratu wypływającego z filtrów pospiesznych w stacji uzdatniania wody jest dziś standardową procedurą. Pierwotnie, klarowność wody do picia miała głównie znaczenie estetyczne [10], później wykazano także negatywną rolę cząstek nierozpuszczonych, które stanowiły dogodne warunki do przetrwania i rozwoju organizmów patogennych. Zaobserwowano także, że przy większych stężeniach zawiesiny efektywność działania dezynfekcji obniżała się. Duża liczba cząstek nierozpuszczonych, powodowała także przekłamania oznaczeń parametrów chemicznych i biologicznych.

Dziś zazwyczaj do oceny ilości cząstek nierozpuszczonych w wodzie wykorzystywany jest pomiar metności, możliwy do przeprowadzenia w systemie "on-line" z dokładnościa $\pm 2\%$ i powtarzalnościa $\pm 1\%$. W wiekszości krajów na świecie pomiar mętności wyznaczany jest nefelometrycznie, a więc poprzez pomiar natężenia światła rozproszonego pod katem 90 stopni [13], ewentualnie w oparciu o pomiar światła transmitowanego, a wiec zmierzonego pod katem zera stopni. W ostatnim czasie, coraz częściej w zakładach uzdatniania wody pojawiają się dodatkowo liczniki cząstek oraz analizatory wielkości cząstek pozwalające bezpośrednio kontrolować liczbe cząstek rozproszonych, a także ich wielkości. Urzadzenia te sa szczególnie popularne w Stanach Zjednoczonych. W Polsce zainteresowanie nimi jest wciąż stosunkowo niewielkie ze względu na zdecydowanie wyższe koszty w porównaniu z kosztami popularnych mętnościomierzy oraz brak powszechnego uznania korzyści płynacych z ich zainstalowania, co ma swoje uzasadnienie. Dostępne obecnie na rynku liczniki cząstek pracują z powtarzalnościa i dokładnościa niższa od aktualnie stosowanych metnościomierzy. Moga więc być przydatne tylko w sytuacjach, w których dostarczają informacji niemożliwych do uzyskania podczas standardowego pomiaru metności. Przeprowadzone w kilku zakładach uzdatniania wody obserwacje [11] wykazały iż w większości przypadków informacje uzyskane z monitoringu liczby cząstek były również możliwe do uzyskania ze standardowo prowadzonego pomiaru metności. Jednak, w niektórych przypadkach zaobserwowano, że liczniki cząstek mogą potencjalnie okazać się bardo przydatne w monitoringu i racjonalizacji procesów uzdatniania wody.

Pomimo niskiej dokładności pomiaru, w niektórych przypadkach liczniki cząstek okazały się być wyraźnie czulsze do identyfikacji nagłych zmian jakości filtratu niż mętnościomierze. Wyższa czułość liczników cząstek w stosunku do czułości mętnościomierzy ujawniła się szczególnie widocznie [1,14,25] przy niższych wartościach mętności, poniżej 0,1 NTU oraz przy wyższym udziale cząstek grubszych w stosunku do cząstek drobniejszych.

Odnotowanie licznych przypadków epidemii wywołanych pierwotniakami [26], głównie oocyst *Cryptosporidium* pochodzącymi z uzdatnionej wody, zaowocowało wprowadzeniem w ostatnich dziesięciu latach w Wielkiej Brytanii i Stanach Zjednoczonych restrykcyjnego prawa [5,6,26] mającego na celu zabezpieczenie się przed tego typu zagrożeniami. W Wielkiej Brytanii wprowadzono konieczność ciągłego monitorowania liczby oocyst *Cryptosporidium* w zakładach uzdatniania wody w których istnieje duże ryzyko ich pojawienia się. W Stanach Zjednoczonych [26] co prawda nie wprowadzono koniczności ciągłego monitorowania oocyst *Cryptosporidium*, ale tylko pod warunkiem że ich usuwalność podczas filtracji będzie utrzymana co najmniej na poziomie 99%. Istniejące techniki oznaczania *Cryptosporidium* są wyjątkowo skomplikowane i długo-trwałe. Podjęto, więc próby [24,22,17,8,9,12] znalezienia łatwych do oznaczenia parametrów zastępczych. Duże nadzieje wiązano z pomiarem liczby cząstek o wielkościach zbliżonych do wielkości oocyst *Cryptosporidium*, na podstawie której możliwe byłoby oszacowanie prawdopodobieństwa ich usuwania. Przeprowadzone dotychczas badania [8] wskazują iż w wielu przypadkach korelacja pomiędzy usuwaniem oocyst *Cryptospo-ridium* a usuwaniem cząstek o wielkościach im równym była raczej niska. Oczywiście podczas stabilnej pracy filtrów, redukcja *Cryptosporidium*, podobnie jak mętności oraz liczby cząstek utrzymywana jest na stałym poziomie. Ewentualnemu obniżeniu usuwalności *Cryptosporidium* towarzyszyć będzie również wzrost liczby cząstek w filtracie. Tak, więc mimo iż pomiar liczby cząstek nie może być traktowany jako bezpośrednie źródło informacji o usuwalności *Cryptosporidium*, nagły wzrost liczby cząstek w filtracie jest jednoczesnym sygnałem spadku usuwalności oocyst *Cryptosporidium*. Wysoka czułość liczników cząstek na zmiany liczby cząstek submikronowych dają łącznie pełną kontrolę w systemie ciągłym pozwalającą zidentyfikować wszelkie zmiany liczby i rozkładu wielkości cząstek rozproszonych w wodzie mogące być sygnałem, któremu potencjalnie może towarzyszyć spadek usuwalności oocyst *Cryptosporidium*.

Wartość mętności w dużej mierze zdeterminowana jest przez zawartą w wodzie ilość cząstek drobniejsze od jednego mikrometra. Stąd, nawet znaczna zmiana ilości cząstek grubszych może nie powodować widocznej zmiany mętności. Wielu badaczy obserwowało [15] początek etapu pogarszania się usuwania cząstek grubszych podczas filtracji o wiele wcześniej za nim dochodziło do etapu pogarszania się usuwania cząstek drobniejszych. Oznacza to, iż pomiar mętności może nie zidentyfikować rozpoczęcia etapu pogarszania się jakości filtratu, podczas gdy licznik cząstek takie pogorszenie zidentyfikuje od samego początku bez względu jakiej wielkości cząstek będzie dotyczyć.

W późniejszym etapie filtracji często obserwowany [2] jest większy przyrost usuwalności cząstek drobniejszych od cząstek grubszych. Oznacza to że udział cząstek grubszych w filtracie w późniejszym etapie zwiększa się, co łatwo można zaobserwować przy pomocy licznika cząstek, a co jest zupełnie nieidentyfikowane przy pomocy mętnościomierza. Licznik cząstek umożliwia lepszą kontrole przebiegu procesu filtracji oraz wcześniejsza identyfikację etapów kolejno po sobie następujących.

Odmienne przebiegi usuwalności cząstek o różnych wielkościach podczas filtracji, różne momenty ich pogarszania się, a także często znacząco różne stopnie efektywności ich usuwania wymuszają konieczność uwzględniania wielkości cząstek w procesie modelowania matematycznego filtracji pospiesznej. Zastępowanie pomiaru liczby cząstek oraz efektywności ich usuwania odczytami pomiaru mętności generuje w niektórych przypadkach wyjątkowo duży błąd. Błąd ten wynika także z faktu iż podstawą większości modeli teoretycznych filtracji pospiesznej jest równanie bilansu masy trudne do właściwego zapisania w oparciu o pomiar mętności.

Odnotowano także korzyści płynące z pomiaru liczby cząstek podczas optymalizacji procesu koagulacji. Zaobserwowano [16] iż optymalną dawkę dozowanego koagulanta można precyzyjniej wyznaczyć mierząc zmiany liczby większych cząstek zamiast mętności wody.

2. Wpływ wielkości cząstek na pomiar mętności

Mętność nefelometryczna, wyrażona w jednostkach NTU, jest miarą intensywności światła rozproszonego na cząstkach zawiesiny pod kątem 90 stopni względem kierunku padania światła. Rozproszenie światła na cząstkach opisują równania Maxwella rozwiązane przez Gustava Mie, znane jako teoria Mie [7]. Dla długości fali równej 860 nm,

zastosowanej przy pomiarze mętności nefelometrycznej zgodnie z normą ISO 7027 [13], zależność intensywności fali świetlnej rozproszonej pod kątem 90 stopni przeliczonej na jednostkę objętości od wielkości cząstki przedstawiono na rysunku 1. Rysunek 1 wyznaczono w oparciu o obliczenia numeryczne [27]. Wpływ cząstek najdrobniejszych poniżej 2 mikronów na pomiar mętności nefelometrycznej przy tym samym stężeniu objętościowym jest dominujący, wpływ cząstek o wielkości powyżej 15 mikronów przy tym samym stężeniu jest bardzo mały.

Przeprowadzone pomiary eksperymentalne [27,30] mętności nefelometrycznej dla zawiesin o trzech różnych składach granulometrycznych, ale jednakowych stężeniach objętościowych potwierdziły znaczący wpływ wielkości cząstek na wartość mętności nefelometrycznej przy tych samych stężeniach zawiesiny. Zgodnie z zależnością przedstawioną na rysunku 1, ta sama objętość cząstek drobniejszych miała zdecydowanie większy wpływ na mętność niż, cząstek większych.



Rys.1. Względne natężenie światła (iloraz natężenia światła rozproszonego pod kątem 90 stopni przez objętość cząstek) w zależności od średnicy cząstki

Fig. 1. Relative light intensity (ratio of 90 degree scattered light intensity to particles volume) versus particle diameter

Wpływ wielkości cząstek zawiesiny na ich usuwanie podczas filtracji

Uwzględniając udowodniony w licznych pracach [7, 21] fakt, że w zależności od wielkości cząstek, dominują inne siły i zjawiska w procesie ich usuwania podczas filtracji przez ośrodek porowaty, zapisano [18,19,20] fundamentalne równania bilansu masy i kinetyki [3] w odniesieniu do każdej frakcji z osobna.

$$i = 1, \dots n$$
 $\frac{\partial \sigma_i}{\partial t} = -\lambda_i \cdot C_i \cdot u$ (1)

$$i = 1, \dots n$$
 $\frac{\partial c_i}{\partial x} = -\lambda_i \cdot C_i$ (2)

Gdzie: Ci - stężenie zawiesiny cząstek i-ego typu zdefiniowane jako iloraz objętości

cząstek o określonej wielkości do objętości zawiesiny w której się znajdują.

t - czas,

x - współrzędna mierzona wzdłuż drogi przepływu,

 λi – funkcja stężenia osadu różna dla cząstek o różnych wielkościach d_i,

 σ_i - stężenie osadu frakcji "i" zdefiniowane jako iloraz objętości zatrzymanych cząstek i-ego typu do objętości porowatego ośrodka,

n - liczba typów cząstek w zawiesinie.

W konsekwencji przebiegi efektywności usuwania frakcji zawiesin o różnej wielkości podczas filtracji [4,19,28,29,30] różnią się między sobą, a to z kolei powoduje, iż rozkład wielkości cząstek pozostałych w filtracie zmienia się w trakcie filtracji. Uwzględniając przedstawiony na rysunku 1 znaczny wpływ nie tylko stężenia zawiesiny, ale także rozkładu wielkości cząstek w niej rozproszonych na pomiar mętności, usuwalność stężenia zawiesiny i mętności muszą się różnić między sobą i w różny sposób zmieniać w kolejnych etapach filtracji. Zależność pomiędzy usuwaniem mętności zdefiniowanej jako absorbancja i usuwaniem stężenia zawiesiny podczas filtracji można wyznaczyć łącząc proste równanie Beer-Lambert [7] z teorią Mie.

$$\frac{C_{out}}{C_{in}} = \frac{Abs_{out}}{Abs_{in}} \cdot \frac{\left(\sum \frac{V_i}{d_i} Q_i\right)_{in}}{\left(\sum \frac{V_i}{d} Q_i\right)_{out}}$$
(3)

gdzie: C_{odp}/C_{dop} –stężenie zawiesiny pozostałej w odpływie ,

di - średnice cząstek rozproszonych w zawiesinie o określonej wielkości,

V_i – objętościowy udział cząstek o średnicy d_i,

Absodp, Absdop - absorbancja w odpływie i dopływie do filtra,

 Q_i – bezwymiarowy współczynnik rozproszenia świetlnego (przyjmowany z zakresu od 0 do 5) cząstek o wielkości d_i

$$Q = 2 - \left(\frac{4}{\rho}\right) \sin \rho + \left(\frac{4}{\rho^2} (1 - \cos \rho)\right)$$
(4)

gdzie: p - bezwymiarowa wartość funkcji względnej wielkości i współczynnika re-

frakcji cząstki, ρ=2α(m-1)

λ – długość fali świetlnej.

 α - miara wielkości cząstki w stosunku do długości fali świetlnej λ , $\alpha = \pi d/\lambda$

m - względny współczynnik załamania równy współczynnikowi załamania cząstki w stosunku do współczynnika załamania cieczy w której się znajduje.

Gorsze usuwanie cząstek drobniejszych względem usuwania cząstek grubszych podczas filtracji powodować będzie iż udział cząstek grubszych w filtracie będzie wyższy niż w wodzie dopływającej do filtra. W konsekwencji efektywność usuwania mętności będzie niższa od efektywności usuwania stężenia zawiesiny. Jeżeli, z kolei, cząstki grubsze będą lepiej usuwane niż cząstki drobniejsze mętność będzie lepiej usuwana od stężenia zawiesiny.

4. Badania eksperymentalne

Badania eksperymentalne filtracji pospiesznej przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym znajdującym sie w Politechnice Krakowskiej. Stanowisko to (rvs. 2) wyposażone jest w część zasilająca w skład, której wchodzi zbiornik ze stali nierdzewnej o pojemności 1 m3 do przygotowywania zawiesiny surowej o odpowiednim stężeniu z wymuszonym mieszaniem hydraulicznym gwarantującym utrzymanie czastek w stanie rozproszonym. Następnie, tak przygotowana zawiesina dopływała do zbiornika przelewowego, który pozwalał utrzymywać zwierciadło wody na stałym poziomie, co było gwarancja utrzymania stałego dopływu zawiesiny do kolumny filtracyjnej. Zawiesina była dodatkowo koagulowana uwodnionym siarczanem glinu, a następnie poddana flokulacji we flokulatorze. Czas przetrzymania zawiesiny we flokulatorze wynosił około 22 minut, a predkość obrotowa mieszadła 13 obrotów na minute. Dozowanie dobranej dawki koagulanta odbywało się przy pomocy pompy perystaltycznej. Proces filtracji zachodził w pleksiglasowej kolumnie o średnicy wewnętrznej 96 mm, wypełnionej złożem piaskowym niejednorodnym o wysokości 80 centymetrów. Granulacje złoża piaskowego w filtrze przedstawiono w tabeli 1. Próbki pobierane były na dopływie i odpływie z filtrów.

Tab. 1. Uziarnienie złoża filtracyjnego

Grain size	Weight percentage
0.4 mm – 0.5 mm	10 %
0.5 mm – 0.63 mm	19 %
0.63 mm – 0.8 mm	31 %
0.8 mm – 1.0 mm	36 %
1.0 mm – 1.25 mm	4 %

Tab. 1. Filtration media grain size

Pomiary zawiesiny przeprowadzono na dopływie i odpływie z filtra. Pomiary ciągłe i cykliczne mętności przeprowadzono przy pomocy dwóch nefelometrów firmy WTW Turb 555 IR wyposażonego w możliwość pracy on-line a także Ratio oraz Turb 550. Natomiast, pomiar wielkości i liczby cząstek w zawiesinie przeprowadzono przy pomocy objętościowego spektrometru przepływowego liquilaz E-20P firmy Particle Measuring System. Liczba cząstek w 1 mililitrze wody nie powinna przekraczać 10 000. Podczas badań warunki te zostały zachowane.

W pierwszej serii badań zawiesina surowa przed jej przefiltrowaniem została poddana koagulacji i flokulacji. W drugiej serii zawiesina surowa była filtrowana z ominiecie procesów koagulacji i flokulacji.

W pierwszej serii badań uwzględniającej flokulację stężenie zawiesiny surowej wynosiło 6,3 mg/l i została skonstruowana poprzez dodanie drobnego pyłu glinokrzemianu pod nazwą SIPERNAT 810 produkowanego przez firmę Degussa do wody wodociągowej. Skład granulometryczny pyłu zmierzony przy pomocy laserowego analizatora wielkości Mastersizer 2000 firmy Malvern Instruments wskazywał na charakterystyczne wartości średnic D50 = 6,6 mikrona, D90 = 14,2 mikrona i D10 = 2 mikrony

Tak spreparowaną zawiesinę koagulowano uwodnionym siarczanem glinu i poddano flokulacji a następnie filtracji. Podczas filtracji utrzymywano średnią prędkość filtracji około 6,6 m/h. Średnia temperatura podczas badań wynosiła około 15,9 C. Cykl pracy filtra wynosił około 8 h. Próbki pobierano przy wpływie do i wypływie z kolumny filtracyjnej.



- Rys.2. Stanowisko laboratoryjne (1 - zbiornik do przygotowywania zawiesiny, 2- zbiornik przelewowy, 3 – zbiornik z koagulantem, 4 – flokulatory, 5 – kolumna filtracyjna)
- Fig.2. Laboratory set-up (1 – suspension preparation tank, 2 – overflow tank, 3 – coagulant, 4 – flocculator, 5 – filtration column)

W serii drugiej podczas której pominięto proces koagulacji wodę surową spreparowano dodając do wody wodociągowej drobny pył krzemianu pod nazwą SIPERNAT 310 wyprodukowany przez firmę Degussa. Granulacja pyłu zmierzona laserowym analizatorem wielkości cząstek Mastersizer 2000 wynosiła D10 = 5 mikronów, D50 = 12 mikronów, D90 = 30 mikronów.

Na rysunkach 3, 4 i 5 przedstawiono analizę przebiegu usuwalności mętności, liczby wszystkich cząstek powyżej 2 mikronów, cząstek z poszczególnych grup wielkości oraz objętościowego stężenia zawiesiny, odpowiednio na rysunkach 3 i 4 dla badań filtracji poprzedzonych flokulacją oraz na rysunku 5 z jej pominięciem.

Zgodnie z przypuszczeniem usuwalność wszystkich badanych parametrów podczas filtracji poprzedzonej flokulacją była generalnie wyższa niż podczas filtracji z jej pominięciem. Charakterystyczne było jednak to iż podczas filtracji poprzedzonej flokulacją usuwalność cząstek najdrobniejszych była od razu dość wysoka i utrzymywała się aż do końca na podobnym poziomie (rys 3). W początkowym etapie można było nawet zaobserwować etap poprawy usuwalności najdrobniejszych cząstek. Usuwalność cząstek grubszych (rys. 4) choć początkowo równie wysoka dość szybko zaczęła znacząco maleć. Usuwalność oparta o pomiar mętności nefelometrycznej nie zanotowała tego spadku. Zanotował natomiast wzrost w początkowym etapie filtracji podczas którego usuwalność najdrobniejszych cząstek również wzrastała, usuwalność cząstek grubszych natomiast utrzymywała się wtedy na tym samym poziomie. Korelacje pomiędzy przebiegami usuwania cząstek o różnych wielkościach oraz mętności tłumaczy rysunek 1 oraz wcześniej opisane analizy parametru mętności na którego wpływ mają przede wszystkim cząstki najdrobniejsze. Nawet znaczne zmiany objętości cząstek o wielkości powyżej 10 mikronów nie mają większego wpływu na wielkość mętności nefelometrycznej.



Rys.3 Efektywność usuwania cząstek drobniejszych (2-10 mikronów), stężenia zawiesiny, sumarycznej liczby cząstek oraz mętności podczas filtracji poprzedzonej flokulacją

Fig. 3. Removal efficiency of finer particles (2-10 microns), suspension concentration, total particle number and turbidity during filtration preceded by flocculation



Rys.4 Efektywność usuwania cząstek grubszych (10-125 mikronów), stężenia zawiesiny, sumarycznej liczby cząstek oraz mętności podczas filtracji poprzedzonej flokulacją

Fig. 4. Removal efficiency of coarser particles (10-125 microns), suspension concentration, total particle number and turbidity during filtration preceded by flocculation

Przedstawione na rysunku 5 przebiegi usuwania poszczególnych frakcji wielkości cząstek, wskazywały na ich ciągłą poprawę podczas całego filtrocyklu. Dotyczyło to w takim samym stopniu frakcji drobniejszych jak i grubszych. Początkowo, ich usuwalność była zdecydowanie niższa niż podczas filtracji poprzedzonej koagulacją. Dla żadnej z frakcji, również najgrubszej nie zaobserwowano etapu pogarszania się efektywności ich usuwania. Podczas całego filtrocyklu generalnie lepiej usuwane były frakcje grubsze niż drobniejsze. Konsekwencją tego był niski stopień usuwania parametru mętności, na który decydujący wpływ miały cząstki najdrobniejsze.



Rys.5 Efektywność usuwania cząstek podczas filtracji nie poprzedzonej flokulacją

Fig. 5. Fractional removal efficiency during filtration not preceded by flocculation

Przedstawiony na rysunku 4 wcześniejszy spadek efektywności usuwania cząstek grubszych można łatwo uzasadnić. Procesowi filtracji pospiesznej towarzyszy przyrost osadu w złożu, którego konsekwencją jest spadek porowatości złoża. Malejąca porowatość złoża powoduje przyrost prędkości przepływu pomiędzy ziarnami oraz wzrost naprężeń ścinających. Przekroczenie granicznej wartości naprężeń ścinających wewnątrz złoża powoduje gwałtowny spadek usuwania cząstek. Graniczna wartość usuwania grubszych cząstek w porach złoża pojawia się znacznie wcześniej niż graniczna wartość usuwania cząstek drobniejszych, stąd efektywność usuwania cząstek większych od 25 mikronów podczas filtracji poprzedzonej flokulacją zaczyna maleć już po 4 godzinach, efektywność usuwania cząstek z przedziału 15-25 mikronów pogarsza się dopiero po 6 godzinach. Pogarszanie się efektywności cząstek drobniejszych jest znikome i pojawia się dopiero w ostatniej godzinie. Stąd, również prawie niezauważalny spadek usuwania mętności pod koniec filtrocyklu.

Eksperymenty przedstawione na rysunku 4 wskazują na wyraźnie wyższą czułość pomiaru licznikiem cząstek na zmiany usuwania grubszych cząstek towarzyszących procesowi filtracji. Pomiar licznikiem cząstek pozwolił zidentyfikować początkową fazę etapu pogarszania się efektywności usuwania cząstek grubszych, co nie zostało zanotowane przy pomocy pomiaru mętności. Bardzo wyraźnie natomiast została zanotowana poprawa w pierwszym etapie filtracji, która zdeterminowana była głównie przez cząstki najdrobniejsze.

Przebiegi usuwania cząstek o różnych wielkościach podczas obu eksperymentów różniły się od siebie. Stopień usuwania objętościowego stężenia zawiesiny i jego przebieg podczas filtracji był generalnie zbliżony do przebiegu i stopnia usuwania frakcji grubszych. Natomiast, stopień usuwanie sumarycznej liczby cząstek powyżej 2 mikronów rozproszonych w dopływającej zawiesinie był bliższy usuwaniu cząstek najdrobniejszych. Jest to oczywiste, gdyż liczba cząstek drobniejszych w zawiesinie była znacząco większa od liczby cząstek grubszych, objętość natomiast dokładnie odwrotnie. Rozbieżności pomiędzy usuwalnością i przebiegiem stężenia zawiesiny a poszczególnymi frakcjami wielkości cząstek, szczególnie tymi drobniejszymi wskazują na konieczność uwzględniania w modelach matematycznych równań kinetyki i bilansu masy zapisanych osobno dla poszczególnych frakcji. Przyjmowanie jednego równania bilansu masy i kinetyki, choć znacząco upraszcza modelowanie wydaje się iż może w niektórych przypadkach generować znaczące błędy i nie dostarcza pełnej informacji o jakości uzyskiwanego filtratu, co może mieć duże znaczenie przy projektowaniu i eksploatacji filtrów, ale także procesu koagulacji i flokulacji oraz sedymentacji. Zidentyfikowanemu wcześniej etapowi pogarszania się usuwania cząstek grubszych można zapobiec dostosowując parametry pracy filtra [23], procesu koagulacji lub osadnika.

5. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania eksperymentalne oraz obliczenia numeryczne oparte na teorii rozpraszania światła Gustava Mie wskazują na bardzo duży wpływ rozkładu wielkości cząstek rozproszonych w zawiesinie na pomiar mętności.

Licznik cząstek dostarczał zdecydowanie bogatsze informacje, efektywność usuwania poszczególnych cząstek była znacząco różna. Podczas eksperymentów w których filtracja poprzedzona była flokulacją efektywność cząstek większych dość szybko zaczęła się obniżać, cząstki drobniejsze podobnie jak mętność nawet pod koniec filtrocyklu były usuwane w dość wysokim stopniu. Potwierdziło to fakt, że mętność podczas filtracji jest usuwana w podobnym stopniu jak cząstki najdrobniejsze. Przebieg usuwania grubszych cząstek, które często mogą stanowić znaczący udział objętości wszystkich cząstek, może przebiegać zupełnie inaczej. Licznik cząstek umożliwia wyznaczenie momentu w którym efektywność usuwania cząstek grubszych zaczyna obniżać się mimo, iż usuwalność mętności pozostaje na niezmienionym poziomie.

Przyjmowanie jako podstawy dla modeli teoretycznych jednego równania bilansu masy uwzględniającego tylko całkowite stężenie zawiesiny, pomijając równania bilansu masy dla poszczególnych grup wielkości cząstek zawiesiny może generować znaczące błędy projektowe. Jeszcze większe błędy mogą pojawić się, jeżeli w modelu matematycznym posłużymy się parametrem mętności jako substytutem stężenia zawiesiny, co często jest praktykowane.

Usuwalność cząstek drobniejszych w początkowym etapie filtracji często, szczególnie gdy proces nie jest poprzedzony flokulacją, jest niższa od usuwalności cząstek grubszych. Udział procentowy cząstek drobniejszych w odpływie będzie wyższy niż w dopływie do filtra. Oznacza to, iż wtedy usuwalność oparta o pomiar mętności może dostarczać wartości zaniżonych w stosunków do usuwania stężenia zawiesiny. W późniejszym etapie filtracji pogarszanie usuwalności cząstek grubszych często następuje wcześniej niż cząstek drobniejszych. Efektem tego jest wyższy procentowy udział cząstek grubszych w filtracie niż w wodzie dopływającej do filtra. To z kolei owocuje wyższym usuwaniem mętności niż stężenia zawiesiny.

Licznik cząstek dostarcza pełnej informacji na temat etapu pogarszania się jakości filtratu, który często brany jest pod uwagę przy wyznaczaniu długości filtrocyklu.

Bibliografia

- [1] Adham, S.S., Jacangelo, J.G., Laine, J.M. Assasing integrity. J. AWWA, 1995, 87 (3) 62-95
- [2] Clark S.C., Lawler D.F., Cushing R.S. Contact filtration: particle size and ripening. *J AWWA*, 1992, 84 (12) 61-71.
- [3] Dąbrowski W. Consequences of the mass balance simplification in modelling deep bed filtration. *Water Research*. 1988, 22(10) 1219-1227
- [4] Darby J.L., Lawler F. D. Ripening in depth filtration: Effect of particle size on removal and head loss. *Environmental Science Technology*. 1990, 24(7) 1069-1079.
- [5] DETR Water Supply Regulations (Water quality) (Amendment), No. 1524, HMSO, 1999
- [6] Drinking Water Inspectorate: The Water Supply (Water Quality) Regulations 2000, SI No. 3184 England, The Water Supply (Water Quality) Regulations 2001, SI No. 3911 (W.323) Wales.
- [7] Elimelech, M., Gregory, J., Jia, X., Williams, R.A. Particle deposition and aggregation. Measurement, modeling and simulation. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1995
- [8] Emelko M.B., Huck P.M., Coffey B.M. A review of Cryptosporidium removal by granular media filtration. JAWWA, 2005, 97(12)101-117.
- [9] Emelko M.B., Huck P.M. Microsphers as surrogates for filtration of Cryptosporidium. J. AWWA, 2004, 96(3) 94-105
- [10] Gregory, J. Turbidity and beyond. Filtration & Separation, 1998, 35 (1) 63-67
- [11] Hamilton, P.D., Standen, G., Evans, A.D., Doyle, J.D., Parsons, S.A. The use of particle size counting in minimizing Cryptosporidium risk at a groundwater supply works. J. CIWEM, 2000, 14 (5) 377-384
- [12] Hatukai S., Ben-Tzur Y., Rebhun M. Particle counts and size distribution in system design for removal of turbidity by granular deep bed filtration. *Water Science & Technology*, 1997 36(4) 225-230
- [13] ISO Standards 7027:1999, Water quality determination of turbidity.
- [14] Jacangelo, J.G., Laxn J.M., Carns, K.E., Cummings, E.W., Mallevialle, J. Lowpressure membrane filtration for removing Giardia and microbial indicators. J. AWWA. 1991, 83 (9) 97-106
- [15] Kavanaugh M.C., Tate C.H., Trussell K.K., Trussell R.R., Treweek G., Use of particle size distribution measurements for selection and control of solid/liquid separation processes 1980
- [16] Lartigas B.S., Bottero J.Y. Democrate C., Coupe J.F. Optimising flocculant demand by following floc size distribution. J. Wat SRT- Aqua, 1995, 44(5) 219-223
- [17] LeChevallier M.W., Norton W.D. Examining relationships between particle counts and Giardia. Cryptosporidium and turbidity. *JAWWA*, 1992, 84(12)54-60
- [18] Mackie R.I., Zielina M., Dąbrowski W. Filtrate quality from different filter operations. Acta Hydrochimica et Hydrobiologica, 2003, 31(1) 25-35

- [19] Mackie R. I., Bai R. The role of particle size distribution in the performance and modelling of filtration. *Water Sci. Technol*, 1993, 27(10) 19-34
- [20] Mackie R.I., Zhao Q. A framework for modelling removal in the filtration of polydisperse suspensions. *Water Research*, 1999, 33(3) 794-806
- [21] McDowell-Boyer, L.M., Hunt, J.R., Sitar, N. Particle transport through Porous media. J. Water Resour. Res, 1986, 22 (13) 1901–1921
- [22] Nieminski, E.C., Ongherth, J.E. Removing Giardia and Cryptosporidium by conventional treatment and direct filtration. J. AWWA, 1995, 87(9) 96-101
- [23] O'Connor J., O'connor T., Twait R., Water treatment Plant performance evaluations and operations, Wiley, 2009.
- [24] Onghert, J.E., Pecoraro, J.P. Removing Cryptosporidium using multimedia filters. J. AWWA, 1995, 87 (12) 83-88
- [25] Tate, C.H., Trussell, R.R. The use of particle counting in developing plant design criteria. *J.AWWA*, 1978, 70 (12) 691-688
- [26] US EPA 2006, National Primary Drinking Water Regulations: Long Term 1 Enhanced Surface Water Treatment Rule; Final Rule. 40 CFR Parts 9, 141, and 142
- [27] Zielina M. Próby interpretacji mętności w wodzie uzdatnianej. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 2007, 2, 24-28
- [28] Zielina M. Experimental research into depth filtration. Environment Protection Engineering, 2007, 33(2) 249-256
- [29] Zielina M., Hejduk L. Measurement of depth filters efficiency for water treatment. FILTRATION, 2007, 7(3) 225-228
- [30] Zielina M. Measurement of suspended particles in water filtration, 14 International Water Technology Conference Proceedings, Cairo, Egypt. 105–113