

Adam HOFMAN, Marek DZIUBIŃSKI, Jarosław SOWIŃSKI

e-mail: 800433@edu.p.lodz.pl

Katedra Inżynierii Chemicznej, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź

Sedymentacja mikrocząstek osadów wodociągowych

Wstęp

Jedną z głównych przyczyn pogorszenia się jakości wody w sieciach wodociągowych są cząstki osadów stałych osadzonych na ściankach przewodów wodociągowych. Osady te są najczęściej produktem wtórnego zanieczyszczenia wody.

Analiza opadania mikrocząstek osadów może przyczynić się do skuteczniejszego określenia warunków odpowiadających za depozycję osadu w przewodach sieci wodociągowej. Występujące w literaturze przedmiotu modele opisujące deponowanie cząstek osadów w sieciach wodociągowych najczęściej wykorzystują podstawowy model *Stokesa* opisujący opadanie pojedynczej cząstki [Pothof i Blokker, 2012]. Spośród wielu modeli określających prędkość sedymentacji zawiesiny do najczęściej stosowanych należą modele: *Richardsona* i *Zaki* oraz *Garside'a* i *Al-Dibouni* [Dziubiński i Prywer, 2009].

Celem pracy było określenie rozmiaru mikrocząstek osadów wodociągowych, rozkładu wielkości cząstek oraz prędkości sedymentacji zawiesin mikrocząstek w wodzie. Porównano otrzymane wyniki z modelami literaturowymi opisującymi prędkość sedymentacji.

Badania doświadczalne

Materiały. Próbki wody do badań pobierano w trakcie upustów hydraulicznych z sieci wodociągowej w Poddębicach. Próbki zostały pobrane z wodociągu przy ulicach Krótkiej i Łódzkiej.

Aparatura. Analizę pobranej wody przeprowadzono za pomocą urządzeń *Fritsch Analyzer* i *Turbiscan LAB Expert*.

Analiza granulometryczna zawiesin za pomocą urządzenia *Fritsch Analyzer* pozwoliła określić rozkład średnic mikrocząstek osadów w wodzie wodociągowej pobranych podczas upustów.

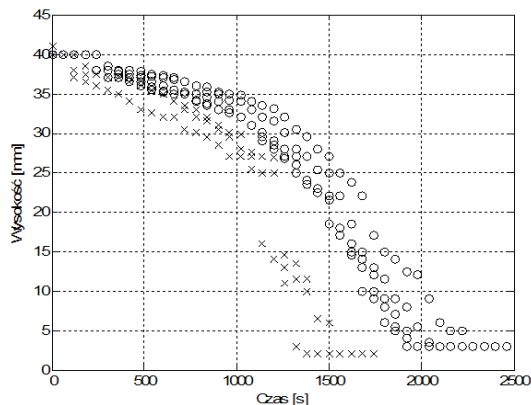
W celu określenia przebiegu procesu sedymentacji osadów wodociągowych wykorzystano *Turbiscan LAB Expert*.

Wyniki pomiarów

Analiza granulometryczna zawiesin wykazała, że dominującą frakcją były cząstki w zakresie średnic od 5 do 50 μm . Maksymalna średnica cząstki wynosiła 100 μm , wartość średniej arytmetycznej średnic cząstek wynosiła 21 μm , zaś średnia geometryczna średnic cząstek wynosiła 13 μm [Hofman i Sowiński, 2015].

Przykładowe wyniki przebiegu procesu sedymentacji osadów wodociągowych przedstawiono na rys. 1.

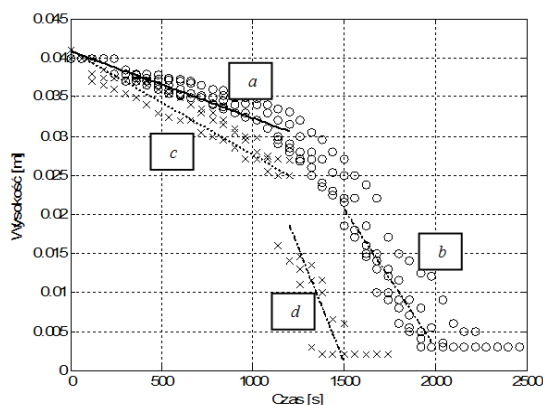
Stężenia masowe badanych zawiesin wynosiły odpowiednio: dla osadu pobranego na ulicy Krótkiej $C_m = 0,355\%$, dla osadu pobranego przy ulicy Łódzkiej $C_m = 0,096\%$.



Rys. 1. Krzywa opadania mikrocząstek osadów wodociągowych (Oznaczenia próbek: o – ul. Krótką, x – ul. Łódzka)

Zawiesina mniej stężona (pobrana z ul. Łódzkiej) szybciej podlegała sedymentacji w porównaniu z zawiesiną bardziej stężoną (pobraną z ul. Krótkiej). Stężenie zawiesiny może mieć wpływ na proces aglomeracji, a także na oddziaływania między cząstkami osadów [Dziubiński i Prywer, 2009].

Z analizy danych doświadczalnych przedstawionych na rys. 1 wynika, że prędkość sedymentacji badanych zawiesin mikrocząstek znacznie zmieniała się w czasie. Po upływie około 1000 s prowadzenia procesu sedymentacji obserwuje się wyraźne zwiększenie się jej prędkości. W celu opisu uzyskanych danych doświadczalnych zaproponowano więc ich podzielenie na dwa zakresy. Dla każdej zawiesiny i każdego zakresu procesu sedymentacji zaproponowano odpowiednią linię trendu danych doświadczalnych.



Rys. 2. Dopasowanie linii trendu do otrzymanych wyników pomiarów

Dla tak określonych obszarów z nachylenia linii trendu obliczono prędkości sedymentacji zawiesin mikrocząstek. Wyniki obliczeń zestawiono w tab. 1.

Tab. 1. Prędkość sedymentacji mikrocząstek wyznaczona doświadczalnie

Lokalizacja poboru próbki	1 – ul. Krótka		2 – ul. Łódzka	
Obszar określony na rys. 2	a	b	c	d
Prędkość $\cdot 10^5$, [m/s]	0,858	3,539	1,341	5,841

Z danych doświadczalnych przedstawionych w tab. 1 wynika, że prędkości sedymentacji badanych zawiesin mikrocząstek są rzędu 10^{-5} m/s.

Metodyka obliczeń

Doświadczalne wartości prędkości sedymentacji mikrocząstek porównano z wartościami obliczonymi za pomocą wybranych modeli opisujących sedymentację zawiesin. Założono, iż mikrocząstki badanych osadów mają kształt kulisty zaś ich gęstość wynosi $\rho_p = 1200 \text{ kg/m}^3$ [van Thienen, 2011].

Do porównania wybrano [Dziubiński i Prywer, 2009]:

– model *Richardsona* i *Zaki*:

$$V_z = V_o \varepsilon^z \quad (1)$$

– model *Garside'a* i *Al-Dibouni*:

$$V_z = V_o \left(1 + 2,35 \frac{d_p}{D} \right)^{-1} \varepsilon^z \quad (2)$$

gdzie:

d_p – średnica cząstki [m]

D – średnica kuwety [m], $D = 27,5 \text{ mm}$

V_z – prędkość opadania zawiesiny [m/s]
 V_o – prędkość opadania pojedynczej cząstki [m/s]
 Z – wykładnik potęgi, zależny od wartości liczby *Reynoldsa* przy opadaniu pojedynczej cząstki [-]
 ε – porowatość zawiesiny [-]

Prędkość opadania pojedynczej cząstki V_o określa równanie *Stokesa*:

$$V_o = \frac{d_p (\rho_p - \rho_w) g}{18 \mu} \quad (3)$$

gdzie:

ρ_p – gęstość cząstki, [kg/m³]
 ρ_w – gęstość cieczy, [kg/m³]
 g – przyspieszenie ziemskie, [m/s²]
 μ – lepkość dynamiczna cieczy, [kg/(m·s)]

Porowatość zawiesiny ε została określona następująco:

$$\varepsilon = \frac{V_w}{V_w + V_p} \quad (4)$$

gdzie:

V_w – objętość wody, [m³]
 V_p – objętość cząstek, [m³]

Założono, iż woda stanowi około 40 % dodatkowej masy cząstki [van Thienen i in., 2011] i na podstawie tego założenia określono porowatość zawiesiny. Dla zawiesiny pobranej przy ul. Łódzkiej wynosiła ona $\varepsilon = 0,9987$, a z ul. Krótkiej $\varepsilon = 0,9951$.

Zależność opisująca wykładnik potęgi Z w równaniach (1) i (2) jest uzależniona od wartości liczby *Reynoldsa* dla opadania pojedynczej cząstki Re_o ,

$$Re_o = \frac{V_o d_p \rho_w}{\mu} \quad (5)$$

Dla wartości liczby *Reynoldsa* mniejszej niż 0,2, wykładnik potęgi Z opisany jest równaniem

$$Z = 4,65 + 20 \frac{d_p}{D} \quad (6)$$

W celu określenia prędkości sedimentacji zawiesin mikrocząstek wykorzystano równania (1) - (6). W obliczeniach stosowano średnią średnicę geometryczną (13 μ m) lub średnią średnicę arytmetyczną (21 μ m) mikrocząstek wyznaczoną eksperymentalnie za pomocą aparatu *Fritsch Analyzer*.

Analiza wyników

Porównano wyniki obliczeń prędkości sedimentacji zawiesin mikrocząstek wykonanych dla wyżej wymienionych średnic z wynikami uzyskanymi podczas przeprowadzonych badań doświadczalnych. Wyniki obliczeń przedstawiono w tab. 2.

Tab. 2. Zestawienie prędkości sedimentacji obliczonych wg modeli literaturowych

Średnica cząstki, [μm]	Obliczona prędkość sedimentacji · 10 ⁻⁵ [m/s]				
	Cząstka	Zawiesina mikrocząstek,			
		próbka z ul. Krótkiej		próbka z ul. Łódzkiej	
	wg <i>Stokesa</i>	wg <i>Richardsona i Zaki</i>	wg <i>Garside'a i Al-Dibouni</i>	wg <i>Richardsona i Zaki</i>	wg <i>Garside'a i Al-Dibouni</i>
13	1,857	1,815	1,811	1,845	1,844
21	4,845	4,736	4,724	4,815	4,812

Wartości prędkości sedimentacji określone za pomocą modeli *Richardsona i Zaki* oraz *Garside i Al-Dibouni* są zbliżone dla obu badanych zawiesin. Obliczone modelowe wartości prędkości sedimentacji mikrocząstek były mniejsze od wartości doświadczalnych od 40% do maksimum 74 %.

Stwierdzono, że w wybranych modelach sedimentacji decydujący wpływ na wartość przewidywanej prędkości sedimentacji miały średnice mikrocząstek zawiesiny przyjęte do obliczeń. Wynik porównania wartości prędkości sedimentacji cząstek dla dwóch sposobów definiowania średniej średnicy cząstek wskazuje na decydujący wpływ średnicy na obliczane wartości prędkości opadania.

W przypadku opadania zawiesin niehomogenicznych, o małych stężeniach mikrocząstek w zawieszynie (a takie zawiesziny były właśnie badane), w celu uproszczenia obliczeń prędkości sedimentacji wykonuje się obliczenia przyjmując modele sedimentacji jak dla zawiesin homogenicznych, ale stosuje się średnią wartość średnicy cząstek zawiesiny niehomogenicznej. Analiza otrzymanych wyników wskazuje, że w pierwszej fazie opadania badanych zawiesin mikrocząstek pochodzenia wodociągowego dla przedziału czasu od 0 do 1000 s użycie do obliczeń prędkości sedimentacji średniej geometrycznej średnicy mikrocząstek daje zdecydowanie większą dokładność opisu danych doświadczalnych niż zastosowanie średniej arytmetycznej średnicy mikrocząstek. Natomiast w drugim etapie sedimentacji w czasie powyżej 1000 s, lepszą dokładność opisu uzyskanych wyników doświadczalnych otrzymuje się stosując średnią arytmetyczną średnicę mikrocząstek.

W trakcie pomiarów zaobserwowano, że w pierwszej fazie opadania pojedyncze aglomeraty mikrocząstek o rozmiarach znacznie przewyższających pozostałe mikrocząstki nie wpływają znacząco na prędkość sedimentacji zawiesiny, natomiast zwiększają znacząco wartość średniej arytmetycznej średnicy cząstek. Wpływ ten na wartość średnicy geometrycznej jest znacznie mniejszy. W drugiej fazie opadania postępujący proces aglomeracji powoduje zmniejszenie zróżnicowania średnic cząstek. Zawieszyna staje się bardziej jednorodna, przez co użycie do obliczeń średniej średnicy arytmetycznej mikrocząstek zawiesiny jest bardziej poprawne.

Należy również zauważyć, że struktura badanych cząstek zawiesiny nie jest trwała, dlatego średnice określone w wyniku badań rozkładu granulometrycznego cząstek oraz wyznaczone na ich podstawie średnie wartości średnic cząstek, mogą odbiegać od wielkości występujących w trakcie sedimentacji. Nietrwała struktura cząstek powoduje, że podczas analizy granulometrycznej cząstek może nastąpić ich rozrywanie bądź łączenie, co następnie znajduje swoje odzwierciedlenie w otrzymanych wynikach. Również w trakcie sedimentacji może dochodzić do łączenia struktur cząstek, przez co obserwuje się zwiększenie prędkości w drugiej fazie opadania. Zagadnienie sedimentacji zawiesin mikrocząstek wodociągowych ze względu na swą złożoność powinno stać się przedmiotem dalszych intensywnych badań.

Wnioski

Proces sedimentacji mikrocząstek osadów wodociągowych jest bardzo skomplikowany i słabo opisany w literaturze przedmiotu. Jego poznanie może w znaczący sposób wpłynąć na opis depozycji mikrocząstek w rurach wodociągowych, co umożliwi planowanie plukania rurociągów w celu wyeliminowania zagrożenia pogarszania się jakości wody na skutek podrywania wcześniej zdeponowanych cząstek osadów.

Badania turbidymetryczne mogą być z powodzeniem stosowane do określenia prędkości sedimentacji mikrocząstek osadów wodociągowych.

Porównując wyznaczone doświadczalnie wartości prędkości sedimentacji zawiesin mikrocząstek z wartościami obliczonymi za pomocą wybranych modeli sedimentacji stwierdzono, że przy zastosowaniu stałej średnicy cząstek (w postaci średniej arytmetycznej średnicy 21 μ m, czy też średniej geometrycznej średnicy 13 μ m) występują znaczne różnice między nimi. Wydaje się, że w celu dokładniejszego opisu procesu sedimentacji mikrocząstek osadów wodociągowych, konieczne jest uwzględnienie zmiany średnicy cząstek w czasie procesu. Jest to związane z rozbudowaniem modeli o proces aglomeracji cząstek, co będzie przedmiotem dalszych badań.

LITERATURA

- Dziubiński M., Prywer J., 2009. *Mechanika płynów dwufazowych*. WNT, Warszawa
- Hofman A., Sowiński J., 2015. *Instalacje wodociągowej i kanalizacyjnej – projektowanie, wykonanie, eksploatacja*. Seidel-Przywecki, Warszawa (ISBN: 978-83-60956-36-6)
- Pothof I. W., Blokker E. J. M., 2012. Dynamic hydraulic models to study sedimentation in drinking water networks in detail. *Drink. Water Eng. Sci.*, 5, 87-92. DOI: 10.5194/dwes-5-87-2012
- van Thienen P., Vreeburg J. H. G., Blokker E. J. M., 2011. Radial transport processes as a precursor to particle deposition in drinking water distribution systems. *Water Res.*, 45, 1807-1817. DOI: 10.1016/j.watres.2010.11.034