INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH
INFRASTRUCTURE AND ECOLOGY OF RURAL AREAS

Nr 9/2009, POLSKA AKADEMIA NAUK, Oddział w Krakowie, s. 131–142
Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi

Jan Kempiński, Zbigniew Smilgin

HYDROTRANSPORT OSADÓW ŚCIEKOWYCH

SEWAGE TUBULAR TRANSPORTATION

Streszczenie

Przepompowywanie osadów ściekowych w ciągach technologicznych oczyszczania wymaga znajomości parametrów fizycznych, reologicznych i hydraulicznych, co umożliwia prawidłowe wymiarowanie projektowanych instalacji rurowych hydrotransportu. Badane osady pochodziły z warszawskich oczyszczalni ścieków. Do określenia charakterystyki reologicznej i hydraulicznej przeprowadzono badania przepływowe osadów na instalacji rurowej o średnicy D = 0,0207 m.

Opis cech reologicznych dokonano na podstawie 3-parametrowego modelu Herschela-Bulkley'a, podając określone parametry modelu w funkcji koncentracji wagowych c_s. Zaproponowano wymiarowanie rurociągów oparte na bezwymiarowym kryterium typu $\lambda(Re_{gen})$.

Słowa kluczowe: osady ściekowe, parametry reologiczne, liczba Reynoldsa

Summary

The knowledge of the physical, rheological and hydraulic parameters of sewage is required for proper dimensioning of the technological lines of tubular transportation at sewage plants. The authors investigated sewage sediments that originated at the Varsovian sewage treatment plants. Flow tests of sediments were performed with the tubular system of diameter D=0,0207 m and allowed the determination of rheological and hydraulic profile of the tested medium. The description of rheological behavior of the sediments was based on the three-parameter Herschel-Bulkley's model as a function of mass concentration c_s. The authors suggested usage of the dimensionless criterion $\lambda(Re_{gen})$ as a base for pipelines design.

Key words: *sewage sediments, rheological parameters*

WPROWADZENIE

W typowo mechaniczno-biologicznych oczyszczalniach ścieków istnieje problem nadmiaru osadów ściekowych, będących wynikiem realizowanej technologii oczyszczania za pomocą osadu czynnego. Osad nadmierny jest usuwany z ciągu technologicznego oczyszczalni i wymaga dalszej utylizacji. Sposoby utylizacji są różne, w zależności od skali zjawiska i możliwości finansowych przedsiębiorstwa oczyszczalni. Bardzo częste rozwiązanie problemu stanowi włączenie do ciągu technologicznego ogniwa biogazowni, produkującego biogaz, przerabiany na prąd oraz energię cieplną. Innym sposobem jest odwodnienie osadu i produkcja nawozów organicznych. Duża zawartość związków biogennych uprawnia do rolniczego lub przyrodniczego wykorzystania osadów ściekowych. W każdym przypadku należy przetransportować olbrzymie ilości osadów ściekowych w rejon ich wykorzystania. Uwodnione osady należy transportować hydraulicznie przy wykorzystaniu instalacji pompowo-rurowych. Hydrotransport osadów wymaga znajomości parametrów fizycznych, reologicznych oraz hydraulicznych transportowanego medium. Jest to niezbędne do przeprowadzenia analizy pracy układu pompowo-rurowego, pozwalającej na optymalne jego zaprojektowanie.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie metody postępowania przy wymiarowaniu instalacji transportujących osady ściekowe.

CHARAKTERYSTYKA OSADÓW ŚCIEKOWYCH

Osady ściekowe zawierają cząstki mineralne i organiczne, zarówno frakcji koloidalnych, podkoloidalnych jak i drobno dyspersyjnych oraz makrocząsteczki. Cząstki ilaste, makrocząstki, wodorotlenki, a także emulsje są chemicznie aktywne. Różne kształty tych cząstek (m.in. blaszki, igły, nitki), pozwalają na zintensyfikowanie zjawisk powierzchniowych, a bardzo małe ich wymiary powodują wystąpienie sił fizykochemicznych na granicy faz.

Skład jakościowy i ilościowy osadów ściekowych ulega zmianom, a duża zawartość części organicznych powoduje ich niestabilność. Wyniki badań osadów ściekowych wskazują na istotny wpływ koncentracji wagowej, temperatury, powierzchni właściwej i efektów fermentacji na ich wartości parametrów reologicznych.

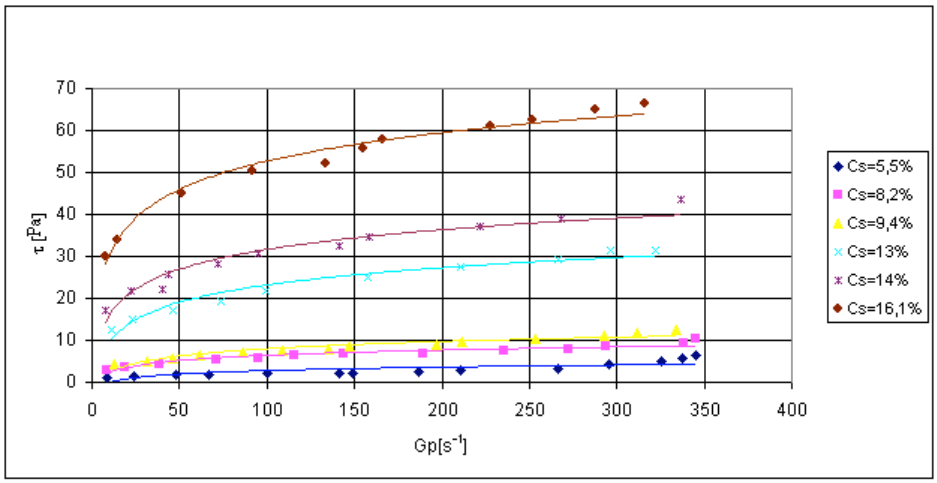
Dla przykładu w tabeli 1 przedstawiono charakterystykę parametrów fizycznych i reologicznych osadów ściekowych pochodzących z Warszawskiej Oczyszczalni Ścieków Komunalnych w Pruszkowie (osady surowe i przefermentowane) oraz z oczyszczalni ścieków Zakładów Papierniczych w Warszawie (osady celulozowe i celulozowo-komunalne). Właściwości reologiczne osadów określono na podstawie badań przeprowadzonych w Instytucie Budownictwa Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa w Warszawie, wykorzystując do badań wiskozymetr rurowy o średnicy D = 0,027 m [Smilgin 2005].

Tabela 1. Parametry fizyczne, reologiczne i hydrauliczne badanych osadów ściekowych
Table 1. Physical, rheological and hydraulic parameters of the tested sediments

Rodzaj osadów komunalnych Type of municipal sediments	Koncentracja wagowa Mass concentra-tion C_S	Współczynnik sztywności Rigidity factor k_H	Liczba strukturalna Structural number n	Próg płynięcia Yield stress τ_0	Koncentracja graniczna C_{Sgr1}	Koncentracja graniczna C_{Sgr2}	Liczba Reynoldsa $Re_{H,kr}$
	[%]	[Pa s^n]	–	[Pa]	[%]	[%]	-
Celulozowe cellulose	7,37	2,9	0,31	1,3	1,0	1,1	3383,55
	10,62	3,8	0,23	1,45			4542,23
	19,55	9,9	0,20	2,80			6066,29
	25,64	12,0	0,192	8,40			5159,10
Celulozowo-komunalne Mixed cellulose-municipal	3,77	0,12	0,38	0,23	1,5	–	2880,04
	8,66	0,3	0,36	0,37			3191,17
	12,34	0,5	0,35	0,65			3450,83
	17,49	4,6	0,34	1,0			3523,17
Komunalne -surowe Municipal raw	5,50	0,10	0,31	0,30	4,2	–	3464,57
	8,20	0,32	0,30	0,40			3046,93
	9,40	0,40	0,29	0,80			3373,52
	13,0	1,30	0,28	3,20			3827,85
	14,0	1,85	0,26	8,20			5004,08
	16,1	2,93	0,26	13,0			4868,26
Komunalne przefermento-wane Municipal fermented	8,23	0,15	0,41	0,43	4,5	5,1	2925,22
	10,36	0,31	0,30	1,50			4031,52
	12,00	0,54	0,30	2,50			4190,62
	12,80	0,75	0,30	4,20			4423,73
	14,45	0,95	0,27	4,20			4797,40
	15,70	1,36	0,26	7,85			5502.32

Badania wiskozymetryczne przeprowadzono przy zachowaniu stałej temperatury osadów (temperatura otoczenia), dla różnych koncentracji wagowych C_S, zmieniających się w przedziale C_S = 5,5–25,64%, zgodnie z metodyką podaną w pracy [Kempiński, Malczewska 2005]. Gęstość badanych osadów zmieniała się w przedziale ρ_m = 1010–1150 kgm^{-3}. Przykładowy przebieg pseudokrzywych płynięcia dla surowych osadów komunalnych przedstawiono na rysunku 1.

Przebieg pseudokrzywych płynięcia wskazuje, że badane osady ściekowe zachowują się jak mieszaniny nienewtonowskie o charakterze plastyczno-lepkim (wystąpienie progu płynięcia τ_0, charakteryzującego ten typ zachowania mieszaniny). Zmienna lepkość plastyczna uniemożliwia aproksymację krzywych płynięcia 2-parametrowym modelem Binghama. Do opisu własności płynięcia mieszaniny należy zastosować 3-parametrowy uogólniony model reologiczny, np. Herschela-Bulkley'a, Vočadlo.



Rysunek 1. Pseudokrzywe płynięcia surowych osadów komunalnych
Figure 1. Pseudo-flow curves for raw municipal sediments

ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ WISKOZYMETRYCZNYCH

Pseudokrzywe płynięcia badanych osadów skorygowano do rzeczywistych krzywych płynięcia zgodnie z metodą podaną przez Metznera i Reeda [Wilkinson 1963]. Natomiast dobór optymalnego modelu reologicznego oraz określenie parametrów modelu dokonano na podstawie analizy statystycznej rzeczywistych krzywych płynięcia, zgodnie z metodyką podaną w pracy [Czaban 1987].

Aproksymację krzywych płynięcia przeprowadzono przy użyciu 3-parametrowego, uogólnionego modelu reologicznego Herschela-Bulkley'a. Model ten zawiera w sobie modele prostsze 2 i 1-parametrowe.

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_0 + k_H \cdot G^n \quad \text{dla } \tau > \tau_0 \\ G &= 0 \qquad\qquad \text{dla } \tau < \tau_0 \end{aligned} \tag{1}$$

Zestawienie parametrów reologicznych badanych osadów ściekowych przedstawia tabela 1.

Osady ściekowe zachowują się jak płyny reostabilne posiadające granicę płynięcia τ_0. Parametry reologiczne modelu są funkcyjnie związane z koncentracją wagową c_s.

OKREŚLENIE STRAT ENERGII W RUROCIĄGACH

Transport hydrauliczny osadów ściekowych odbywa się, w zależności od prędkości przepływu, w trzech zasadniczych reżimach ruchu: laminarnym, przejściowym i turbulentnym. Straty energii zależą przede wszystkim od koncentracji mieszaniny, średniej prędkości przepływu, średnicy i długości przewodu oraz współczynnika oporu rurociągu λ. Analiza przebiegu wykresu zależności strat energii w funkcji prędkości $I_m = f(v)$, w porównaniu ze stratami dla czystej wody $I_w = f(v)$, pozwala na wstępną ocenę zachowania się mieszaniny. W szczególności mamy możliwość bezpośredniego określenia wpływu koncentracji na parametry przepływu w całym zakresie prędkości średnich. Z punktu widzenia oceny reologicznej mieszaniny najważniejszą część wykresu $I_m = f(v)$ stanowi strefa przepływu laminarnego, w której przebieg wykresu jest analogiczny do przebiegu pseudokrzywej płynięcia, charakteryzującej reologiczne zachowanie się mieszaniny. Należy więc zwrócić szczególną uwagę na zapewnienie znacznej ilości punktów pomiarowych w tej strefie przepływu. W większości przypadków stwierdza się, że straty energii rosną wraz ze wzrostem koncentracji mieszaniny.

Zjawisko to jest jednak bardziej skomplikowane. W przypadku przepływu osadów ściekowych w rurociągach zasada ta potwierdza się w zakresie przepływu laminarnego [Smilgin 2005]. Natomiast w reżimie turbulentnym straty energii niekiedy maleją ze wzrostem koncentracji i mogą być w niektórych przypadkach niższe od strat energii dla wody, mierzonych w tych samych warunkach. Zjawisko to stwierdził Jewilewicz dla przepływu szlamów kanalizacyjnych w rurociągach o średnicach 150, 200 i 300 mm [Parzonka 1977].

Analiza wykresów strat energii w funkcji prędkości średniej $I_m = f(v)$ pozwala ponadto określić prędkość krytyczną v_{kr} przejścia z laminarnego do przejściowego reżimu przepływu. Prędkość ta koresponduje z wartością krytycznej uogólnionej liczby Reynoldsa $Re_{gen,kr}$. Natomiast kształt wykresu $I_m = f(v)$ w strefie laminarnej pozwala na ocenę zachowania się mieszaniny i dobór adekwatnego modelu reologicznego [Kempiński 2000].

Opracowane wyniki badań przepływowych w postaci zależności jednostkowego spadku hydraulicznego I_m, w funkcji średniej prędkości v, w danym rurociągu o średnicy D i przy różnych koncentracjach mieszaniny c_s, nie można jednak przenosić bezpośrednio z jednej instalacji na drugą. Przy tych samych parametrach geometrycznych instalacji oraz tych samych średnich koncentracjach mogą wystąpić poważne różnice strat energii przy tłoczeniu osadów ściekowych pochodzących z różnych oczyszczalni ścieków. Wynika to przede wszystkim z różnych cech reologicznych osadów, przy tej samej wartości koncentracji wagowej c_s, jak również z możliwości wystąpienia efektu skalowego [Kempiński 2000].

Ocena cech reologicznych konieczna jest dla prawidłowego wymiarowania instalacji rurowych transportujących ciecze o własnościach lepkich i lepko-plastycznych, tj. o zachowaniu nienewtonowskim. Uogólnienie wyników badań wymaga zastosowania kryterium typu $\lambda(Re_{gen})$.

OKREŚLENIE STRAT HYDRAULICZNYCH W POZIOMYCH RUROCIĄGACH NA PODSTAWIE BEZWYMIAROWEGO KRYTERIUM TYPU $\lambda(RE_{GEN})$

Znajomość cech reologicznych umożliwia uogólnienie wyników badań poprzez zastosowanie bezwymiarowego kryterium typu $\lambda(Re_{gen})$, gdzie λ jest bezwymiarowym współczynnikiem oporu rur z klasycznego wzoru Darcy-Weisbacha:

$$h_{str} = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \tag{2}$$

lub zależności strat ciśnienia:

$$\Delta P = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2} \rho \tag{3}$$

i spadku linii energii:

$$I_m = \lambda \frac{1}{D} \frac{v^2}{2g} \tag{4}$$

Re_{gen} jest uogólnioną liczbą Reynoldsa dla danego modelu reologicznego.

Dla osadów ściekowych celowe jest zastosowanie trzyparametrowego, uogólnionego modelu reologicznego, np. Herschela-Bulkley'a. Dla uogólnienia wyników badań przepływu należy jednak zastosować pełną, uogólnioną liczbę Reynoldsa, z uwzględnieniem cech reologicznych, określonych za pomocą wiskozymetru rotacyjnego lub rurowego.

WYZNACZENIE WSPÓŁCZYNNIKA OPORU RUR λ W STREFIE LAMINARNEJ RUCHU

Dla modelu Newtona, przy przepływie laminarnym, współczynnik oporów liniowych λ jest równy:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \tag{5}$$

gdzie liczba Reynoldsa Re określona jest następującym równaniem:

$$Re = \frac{vD\rho}{\eta} \tag{6}$$

Dla cieczy nienewtonowskich, w laminarnej strefie ruchu, przyjmuje się, analogicznie do zależności (5) dla cieczy newtonowskiej, wynikającej ze wzoru Poiseuilla, poniższą zależność:

$$\lambda = \frac{64}{Re_{gen}} \tag{7}$$

Dla modelu Herschela-Bulkley'a, pełna uogólniona liczba Reynoldsa, podana w pracy [Kempiński 2001], ma następującą postać:

$$Re_{H,gen} = \frac{8v^{(2-n)}D^n\rho}{2^n k}\left|\frac{n}{n+1}\left(1-\frac{\tau_0}{\tau_w}\right)^{\frac{n+1}{n}}\left\{1-\frac{2n}{3n+1}\left(1-\frac{\tau_0}{\tau_w}\right)\left[1+\frac{n}{2n+1}\cdot\frac{\tau_0}{\tau_w}\right]\right\}\right|^n \tag{8}$$

Określenie liczby Reynoldsa $Re_{H,gen}$ według wzoru (8), wymaga znajomości wartości naprężeń stycznych na ścianie rurociągu τ_w. W pracy [Kempiński 2001] podany został również wzór na naprężenia styczne na ściance rurociągu w postaci:

$$\tau_w = \frac{(2v)^n k}{D^n\left|\frac{n}{n+1}\left(1-\frac{\tau_0}{\tau_w}\right)^{\frac{n+1}{n}}\left\{1-\frac{2n}{3n+1}\left(1-\frac{\tau_0}{\tau_w}\right)\left[1+\frac{n}{2n+1}\cdot\frac{\tau_0}{\tau_w}\right]\right\}\right|^n} \tag{9}$$

Określenie τ_w wymaga przeprowadzenia prostych obliczeń metodą kolejnych przybliżeń, podstawiając kolejno $\tau_w > \tau_0$, do momentu spełnienia przedstawionej zależności. Podane wzory (8), (9) są formułami uogólnionymi, upraszczającymi się do modeli prostszych dwu i jedno parametrowych.

Hydrotransport rurowy osadów o wysokiej koncentracji, bliskiej koncentracji tiksotropowej $c_{s,tix}$ odbywa się w przeważającej mierze w laminarnej strefie ruchu. Nieuwzględnienie progu płynięcia τ_0 przy określaniu strat ciśnienia może doprowadzić do poważnych błędów obliczeniowych i w konsekwencji do awarii instalacji hydrotransportu [Kempiński 2001].

KRYTYCZNA LICZBA REYNOLDSA RE_{KR} PODCZAS TRANSPORTU RUROWEGO

Przez krytyczną liczbę Reynoldsa Re_{kr} rozumiemy wartość liczby Reynoldsa określoną przy przejściu przepływu cieczy z reżimu laminarnego w reżim turbulentny ruchu. Dla $Re < Re_{kr}$ ciecz porusza się ruchem laminarnym, natomiast dla $Re > Re_{kr}$ przepływ odbywa się w turbulentnej strefie ruchu. Dla cieczy newtonowskich wartość krytycznej liczby Reynoldsa wynosi Re_{kr} = 2100–2320

[Troskolański 1967]. Podstawy teoretyczne wyznaczenia wartości krytycznej liczby Reynoldsa dla cieczy nienewtonowskiej podali [Ryan, Johnson 1959], bazując na analizie zmienności funkcji określającej liczbę stateczności Z_R.

Czaban [1987], korzystając z metody Ryana i Johnsona, określił wzór na krytyczną liczbę Reynoldsa dla modelu Herschela-Bulkley'a:

$$\mathrm{Re}_{H,kr}^{2/n} = \frac{110{,}64 \cdot 8^{4/n} n(2+n)^{2+n/1+n}}{\lambda^{2/n+1}\left(1-\frac{\tau_0}{\tau_w}\right)^{2/n+1}(3n+1)^2} \tag{10}$$

Wykorzystanie wzoru (10) wymaga, oprócz określenia parametrów reologicznych badanego medium, dodatkowo znajomości prędkości krytycznej przepływu v_{kr}, odpowiadającej przejściu z ruchu laminarnego w ruch turbulentny. Uniemożliwia to wykorzystanie podanej formuły dla celów praktycznych, bez przeprowadzenia laboratoryjnych badań rurowych.

Podjęcie rurowych badań laboratoryjnych jest sprawą kosztowną, wymagającą zaangażowania specjalistycznego zespołu badawczego. Nie zawsze możemy sobie na to pozwolić.

W pracy [Kempiński 2000] porównano uogólnioną liczbę Reynoldsa dla modelu Herschela-Bulkley'a (1), z krytyczną liczbą Reynoldsa dla tego modelu (10), dla warunków brzegowych (przejście z ruchu laminarnego w turbulentny). Zgodność porównywalnych liczb pozwala metodą iteracyjną określić krytyczną liczbę Reynoldsa $\mathrm{Re}_{H,kr}$, tylko na podstawie badań wiskozymetrycznych. Metoda ta jest słuszna również dla modeli prostszych, dwu- i jedno parametrowych.

Dla badanych osadów ściekowych Smilgin [2005], wykorzystując metodykę podaną powyżej, określił wartości krytycznej liczby Reynoldsa $\mathrm{Re}_{H,kr}$. Krytyczna liczba Reynoldsa zmienia się w granicach 2880,04–6066,29, w zależności od własności reologicznych osadu (tab. 1). Wykresy stosowanych formuł na obliczenie krytycznej liczby Reynoldsa przedstawia rysunek 2.

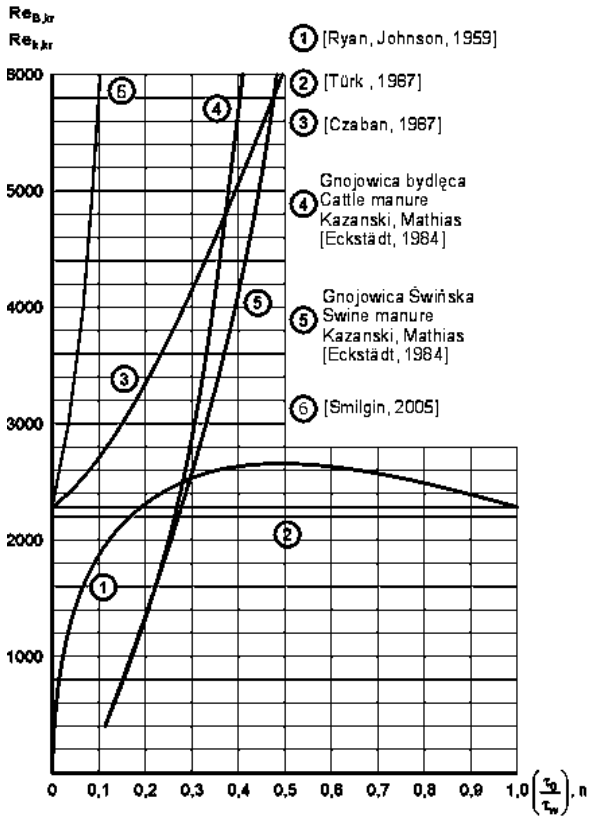
WYZNACZENIE WSPÓŁCZYNNIKA OPORU RUR λ W STREFIE TURBULENTNEJ RUCHU

W reżimie turbulentnym ruchu brak jest aktualnie pełnego ogólnego rozwiązania typu $\lambda(\mathrm{Re}_{gen})$. Istniejące i możliwe do zastosowania rozwiązania ograniczają się do strefy hydraulicznie gładkiej i do prostych cieczy nienewtonowskich o dwóch parametrach reologicznych.

Rozwiązanie oparte o pełny 3-parametrowy model Vočadli zastosował [Tichończuk 1977] – dla opisu przepływu osadów przemysłu cukrowniczego i [Kempiński 1986] – dla przepływu gnojowicy bydlęcej.

Tichończuk w strefie turbulentnej ruchu zaproponował obliczenie współczynnika oporu rur ze wzoru Colebrooka-White'a (11), dla wyznaczonej uogólnionej liczby Reynoldsa Re_{gen} i chropowatości względnej $\varepsilon = k_R/D$.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_p}} = -2\log\left[\frac{2{,}51}{Re_{gen}\sqrt{\lambda_p}} + \frac{k_R}{3{,}72D}\right] \tag{11}$$



Rysunek 2. Krytyczna liczba Reynoldsa Re_{kr}
Figure 2. Reynolds critical ordinal Re_{kr}

Tak obliczoną wartość λ_p koryguje do wartości λ za pomocą liczby strukturalnej n, wynikającej z przyjętego modelu reologicznego, następująco: $\lambda = \lambda_p \cdot n$.

Pełne rozwiązanie typu $\lambda(Re, He)$ dla reżimu turbulentnego podał [Czaban 1990]. Stwierdził on, że wzór Colebrooka-White'a, opisujący opory przepływu

w całej strefie turbulentnej przy przepływie cieczy newtonowskiej, stanowi kombinację zależności ważnych w strefie rur hydraulicznie gładkich i chropowatych. Rozpatrując ciecz o własnościach reologicznych opisanych modelem Herschela-Bulkley'a, podał wzór ważny dla całej strefy turbulentnej przepływu, uwzględniający liczbę Reynoldsa Re_H, parametr β i chropowatość całkowitą rurociągu k_R, w postaci:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\log\left\{\left[\frac{a_1(1-\beta/\lambda)^{1+n}}{Re_H(0{,}25\lambda)^{1-2/n}}\right]^{a_2} + \frac{k_R}{3{,}71D}\right\} \tag{12}$$

gdzie: $a_1 = 10^{0{,}1n-0{,}45}$, $a_2 = n^{-0{,}75}$

$$Re_H = \frac{8v^{(2-n)}D^n\rho}{k\left(6+\frac{2}{n}\right)^n} \tag{13}$$

$$He_v = \frac{\tau_0}{\rho v^2}Re_v^2 \tag{14}$$

oraz parametr

$$\beta = \frac{8He_v}{Re_v^2} \tag{15}$$

Liczbę Reynoldsa Re_H oblicza się według uproszczonego wzoru (13), nieuwzględniającego progu płynięcia τ_0 (ruch turbulentny niszczy strukturę wewnętrzną mieszaniny), a parametr β według wzoru (15).

Reasumując, można wykazać, że współczynnik oporów liniowych λ w strefie turbulentnej ruchu dla przepływu cieczy nienewtonowskich uzależniony jest od liczby Reynoldsa, chropowatości względnej oraz parametrów reologicznych. Budowa strukturalna istniejących wzorów podobna jest natomiast do zależności Blasiusa, Prandtla-Karmana, czy Colebrooka-White'a, obowiązujących dla przepływu cieczy newtonowskich.

WNIOSKI KOŃCOWE

Przeprowadzone badania osadów ściekowych pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków końcowych:

1. Osady ściekowe w całym zakresie badanych koncentracji zachowują się jak ciało plastyczno-lepkie, z charakterystycznym progiem płynięcia τ_0 i pozorną lepkością, zmienną w funkcji prędkości deformacji. Wymaga to przeprowa-

dzenia aproksymacji pseudokrzywych płynięcia, opierają się na 3-parametrowym, uogólnionym modelu reologicznym. Na podstawie oceny statystycznej, dla opisu reologicznego zachowania się badanych osadów ściekowych zastosowano uogólniony trzyparametrowy model Herschela-Bulkley'a.

2. Stwierdzono wyraźną zależność parametrów reologicznych modelu Herschela-Bulkley`a od koncentracji wagowych C_s. Próg płynięcia τ_0, oraz współczynnik sztywności k rośnie wraz z koncentracją wagową C_s, natomiast liczba strukturalna n wykazuje tendencje malejącą ze wzrostem C_s (tab. 1).

3. Znajomość cech reologicznych umożliwia wymiarowanie rurociągów z wykorzystaniem bezwymiarowego kryterium typu $\lambda(Re_{gen})$. Wiąże ono współczynnik oporu rur ze wzoru Darcy-Weisbacha z uogólnioną liczbą Reynoldsa $Re_{H,gen}$ dla modelu Herschela-Bulkley'a, podaną w pełnej, uogólnionej postaci (8).

4. Nie uwzględnienie wpływu progu płynięcia τ_0 w strefie laminarnej ruchu na wartość liczby Reynoldsa dla ciał plastyczno-lepkich, co uzasadnione jest w turbulentnej strefie przepływu, powoduje wystąpienie istotnego błędu, którego wielkość uzależniona jest od liczby strukturalnej n oraz stosunku progu płynięcia τ_0 do wartości naprężeń stycznych τ_w na ściance rurociągu τ_0/τ_w.

5. Znajomość bezwymiarowego kryterium $\lambda(Re_{H,gen})$ pozwala na opracowanie metody wymiarowania rurociągów do transportu mieszanin, uwzględniającej cechy reologiczne oraz charakter przepływu osadów ściekowych. Laminarną i turbulentną strefę ruchu rozgranicza krytyczna liczba Reynoldsa $Re_{H,kr}$. Wartość jej uzależniona jest między innymi od parametrów przyjętego modelu reologicznego i waha się dla badanych osadów w przedziale 2880,04–6066,29.

6. W reżimie turbulentnym ruchu brak aktualnie pełnego, uogólnionego rozwiązania typu $\lambda(Re_{gen})$. Istniejące rozwiązania ograniczają się do strefy hydraulicznie gładkiej i do prostych modeli 2-parametrowych. Budowa strukturalna istniejących wzorów podobna jest natomiast do zależności Blasiusa, Prandtla-Karmana czy Colebrooka-White'a, obowiązujących dla przepływu cieczy newtonowskich.

BIBLIOGRAFIA

Czaban S. *Wyznaczanie parametrów hydrotransportu rurowego reostabilnych mieszanin dwufazowych.* Zeszyty Naukowe AR we Wrocławiu Nr 60, Rozprawy, Wrocław 1987

Czaban S. *Parametry przepływu reostabilnych mieszanin dwufazowych.* Archiwum Hydrotechniki, Tom XXXVII, 1990

Kempiński J. *Hydrauliczna i reologiczna charakterystyka gnojowicy utylizowanej w rolnictwie.* Zeszyty Naukowe AR we Wrocławiu, Rozprawy CLXIX, Nr 378, Wrocław 200.

Kempiński J. *Flow characteristic of homogeneous mixture in laminar flow zone. Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics.* Instytut Budownictwa Wodnego PAN, Gdańsk, VOL XLVIII No 4, 2001, s. 57–68

Kempiński J. *Określenie cech reologicznych gnojowicy dla potrzeb hydrotransportu rurowego*, Zeszyty Naukowe AR we Wrocławiu, Melioracja XXIX, nr 159, 1986, 57–69

Kempiński J., Malczewska B. *Charakterystyka reologiczna osadów ściekowych.* Zeszyty Naukowe AR we Wrocławiu. Monografie XXXV, s. 36–46, Wrocław 2004.

Kempiński J. Malczewska B. *Określenie modelu reologicznego osadów ściekowych.* Acta Scientiarum Polonorum, Seria Formatio Circumiectus 4 (1) s. 99–108, Kraków 2005

Parzonka W. *Hydrauliczne podstawy transportu rurowego mieszanin dwufazowych*. Wyd. Akademii Rolniczej, Wrocław 1977.

Ryan N.W., Johnson M.W. *Transition from laminar to turbulent flow in pipes*. A.I.CH.E., J. 5, 1959.

Smilgin Z. *Kształtowanie reologicznych parametrów osadów ściekowych wykorzystywanych do biologicznego umacniania skarp.* Rozprawa doktorska. Akademia Rolnicza we Wrocławiu, Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji, Wrocław 2005.

Tichończuk W. *Analiza zjawiska płynięcia osadów ścieków cukrowniczych*. Rozprawa doktorska. Politechnika Warszawska, 1977

Türk M., Eckstädt H. *Bemessungskatalog für Gülledruckrohrleintungen*. Schlieben/Bornim, 1987

TroskolańskI A.T. *Hydromechanika*. WNT, Warszawa 1967

Wilkinson W. *Ciecze nienewtonowskie.* WNT, Warszawa 1963

Prof. dr hab. inż. Jan Kempiński
Instytut Inżynierii Środowiska
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
Pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław
e-mail: jan.kempinski@up.wroc.pl

Recenzent: *Prof.dr hab. inż. Jan Pawełek*