

Marcin Janik, Karol Kuś

Analiza możliwości poprawy parametrów transportu hydraulicznego osadów z oczyszczania wody

Zainteresowanie problematyką utylizacji osadów z procesów oczyszczania wody wynika z rosnących wymagań formalnych związanych z utylizacją odpadów. Zasadniczym celem działań podejmowanych w zakładach oczyszczania wody jest maksymalne zmniejszenie objętości osadów i przygotowanie ich do ostatecznego unieszkodliwienia. Podstawowe procesy służące ograniczeniu ilości wytwarzanych osadów obejmują ich zagęszczanie i odwadnianie. Najprostsze są procesy polegające na sedymentacji cząstek i naturalnym zagęszczaniu w urządzeniach przepływowych lub działających okresowo odstożnikach i lagunach. Urządzenia te nie są jednak skuteczne w przypadku trudnoodwadniających osadów pokoagulacyjnych i popłuczyn. Dlatego coraz częściej stosuje się metody mechaniczne wymagające wstępnego chemicznego kondycjonowania osadów [1–4].

Ilość wytwarzanych osadów pokoagulacyjnych wynosi od 0,1% do 5,0% dobowej wydajności zakładu oczyszczania wody i istotnie zmienia się w ciągu roku. Wpływają na to ilość ujmowanej wody oraz wartości jej wskaźników fizyczno-chemicznych, w tym przede wszystkim zawartość zawiesin, mętność, intensywność barwy oraz stosowane dawki koagulantów [5]. Uwodnienie osadów zależy od sposobu i częstości ich odprowadzania z osadników oraz sezonowej zmienności ich właściwości fizyczno-chemicznych, zmieniając się w przedziale od 98,5% do powyżej 99,9% [6]. W przypadku osadów z procesów oczyszczania wód powierzchniowych charakterystyczny jest znaczący udział substancji organicznych, sięgający nawet 50÷60% suchej masy osadu [7]. Mikroorganizmy wchodzące w skład zawiesin organicznych pochodzą bezpośrednio z procesów oczyszczania wody oraz z układu odzyskiwania wody w procesie oczyszczania wód popłuczyn. Liczebność bakterii i organizmów planktonowych wzrasta podczas wiosennych zakwitów [8]. Zawartość mikroorganizmów w masie osadu oraz jego kłaczkowata struktura decydują o udziale wody związanej biologicznie i fizycznie, co wpływa na małą zdolność osadów do odwadniania. Kondycjonowanie osadów za pomocą polielektrolitów zmienia ich strukturę, pozwalając łatwo oddzielić wodę wolną i uzyskać uwodnienie poniżej 95% [9]. Osad po procesie zagęszczania nie powinien zmienić konsystencji płynnej na plastyczną, utrudniającą jego transport hydrauliczny. Osad traci charakter płynącej cieczy przy zawartości suchej masy

8÷10% [10]. Zmniejszenie uwodnienia i komprymacja osadów powoduje odchylenia od właściwości cieczy newtonowskich podczas ich przepływu w rurociągach [11, 12].

Wielkość cząstek decyduje o zachowaniu się osadów podczas płynięcia oraz uwalniania wody w procesach zagęszczania i odwadniania. Osady, jako mieszanina zawierająca cząstki mineralne i organiczne, o wielkości cząstek od koloidalnej po makrocząstki kłaczków, mają strukturę wewnętrzną decydującą o ich właściwościach reologicznych. Cząstki zawiesin kłaczkowatych osadu pokoagulacyjnego o charakterze drobnodispersyjnym mają średnicę nieprzekraczającą 10 µm [13]. Kondycjonowanie osadów polielektrolitami powoduje neutralizację ładunku elektrycznego i aglomerację cząstek. Powstałe w wyniku destabilizacji skupiska tworzą makroflokuły o rozmiarach od kilkunastu do kilkudziesięciu milimetrów. Część wody uwieszonej wcześniej w przestrzeni między kłaczkami staje się wodą wolną [14].

Zawiesiny o rozwiniętej strukturze przestrzennej opisuje się często modelami płynów z granicą płynięcia. Model liniowy Binghama znajduje zastosowanie w praktyce inżynierskiej, choć w rzeczywistości trudno znaleźć ciecz rzeczywiste z granicą płynięcia o liniowym charakterze zależności naprężeń od szybkości ścinania. Wartość granicy płynięcia odpowiada naprężeniom potrzebnym do pokonania sił przyciągania między cząstkami tworzącymi kłaczkę osadu i struktury przestrzennej układu sflokulowanych zawiesin. Naprężenia graniczne wzrastają wraz ze zwiększeniem zawartości suchej masy w osadzie, a więc wraz ze stopniem jego zagęszczenia [15]. Do opisu charakterystyki płynięcia stosuje się również z powodzeniem model potęgowy [10, 16]. Przy małych wartościach szybkości ścinania krzywa interpolująca wartości pomierzonych naprężeń dąży do wartości granicznej. W tym zakresie charakter płynięcia dobrze opisują modele wieloparametrowe Herschela-Bulkley'a, Cassona lub Vocadlo [11]. W przypadku pomiarów przy większych szybkościach ścinania można nie uwzględniać granicy płynięcia i stosować najprostszy model potęgowy Ostwalda-de Waele'a [17].

Charakterystyczną cechą osadów jest tiksotropia, czyli zmniejszenie lepkości w czasie pod działaniem stałego naprężenia, a także powrót do stanu początkowego po jego usunięciu i odtworzenie struktury zawiesin [18, 19]. Zmiany właściwości osadów spowodowane ścinaniem nie są jednak w pełni odwracalne. Trwałe zmniejszenie wartości tarcia wewnętrznego wskutek ścinania płynu nosi nazwę reodestrukcji [18]. Osady należy uważać za układy o właściwościach tiksotropowych, z podatnością do reodestrukcji

pod wpływem ścinania. Zjawisko to widoczne jest jako zmniejszanie wartości pomierzonych naprężeń przy kolejnych pomiarach ścinania tej samej próbki osadu.

Możliwa jest zmiana właściwości reologicznych mechanicznie zagęszczonych osadów pokoagulacyjnych. Proces ten, stosowany dotychczas w oczyszczalniach ścieków, nosi nazwę dezintegracji i polega na destrukcji struktury osadu. Stopień dyspersji osadu zależy od jego właściwości oraz od zastosowanej metody dezintegracji. Osady poddane intensywnemu mieszananiu dezintegrującemu w całej objętości lub przetłoczone przez urządzenie typu stator-rotor ulegają silnemu rozdrobieniu wskutek oddziaływania sił tnących wirujących elementów mechanicznych. Energia wywołująca w osadzie intensywne naprężenia ścinające powoduje zmiany jego właściwości fizycznych. Wielkość rozdrobnionych kłaczków jest odwrotnie proporcjonalna do szybkości ścinania. Usieciowanie w zdeintegrowanym osadzie, obejmujące wcześniej całą objętość sflokulowanych zawieszin, zmienia się w sferyczne struktury i kępki cząstek o wielkości około 20÷50 średnic cząstek. Powoduje to zmniejszenie lepkości osadu nawet o dwa rzędy wielkości [19].

Cel i metodyka badań

Celem badań było doświadczalne określenie zmian właściwości płynięcia zagęszczonych osadów z oczyszczania wody, poddanych dezintegracji mechanicznej, a także ocena możliwości poprawy transportu hydraulicznego osadów poddanych flokulacji.

Badano osady pobrane z zakładu oczyszczania wód powierzchniowych, z odstożników służących do zagęszczania osadów pokoagulacyjnych oraz osadów z oczyszczania popłuczyn ze złóż piaskowych i węglowych. Osad zawierał 1,5% suchej masy, przy udziale 32% masy organicznej i miał konsystencję płynną. Próbki osadów zagęszczono z użyciem polielektrolitu do zawartości suchej masy 3,5%, 4,0% i 4,5% oraz wyznaczono ich gęstość, która wyniosła odpowiednio: 1018 kg/m³, 1021 kg/m³ i 1026 kg/m³. Sflokulowane osady poddano intensywnej dezintegracji mechanicznej przy użyciu homogenizatora laboratoryjnego typu MPW-120 przez 10 min. Zestaw do homogenizacji składał się z pionowego mieszadła typu stator-rotor (o śr. 52 mm) zanurzonego w naczyniu z osadem o objętości 2 dm³.

Pomiary reologiczne wykonano wykorzystując próbki osadu wyłącznie zagęszczonego oraz poddanego dezintegracji mechanicznej. Do opisu właściwości reologicznych osadu przyjęto model potęgowej Ostwalda-de Waele'a, którego parametry określono w badaniach wiskozymetrycznych. Model ten zaliczany jest do najczęściej stosowanych w reologii, w prosty sposób opisując zależność naprężenia stycznego od szybkości ścinania [18]:

$$\tau = k \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

w którym:

τ – naprężenia styczne, Pa

$\dot{\gamma}$ – średnia szybkość ścinania, 1/s

k – wskaźnik konsystencji, Pa·sⁿ

n – wskaźnik płynięcia

W badaniach reologicznych osadów, które zawierają kłaczkę o dużych rozmiarach oraz łączą właściwości tiksotropowe i zdolność do reodestrukcji, istotny jest sposób wykonania pomiarów. Badania polegały na pomiarze naprężeń stycznych przy zmiennych szybkościach ścinania w reometrze (wiskozymetrze) rotacyjnym z układem

współosiowych cylindrów. Pomiary wykonano za pomocą zmodernizowanego reometru rotacyjnego typu Rheotest 2. Zestaw reometru wyposażony został w sterownik umożliwiający regulację prędkości zainstalowanego serwonapędu i zadawanej w ten sposób szybkości ścinania. Rejestracja szybkości ścinania oraz naprężeń stycznych, a także sterowanie reometrem odbywało się przy użyciu komputera. Badania reologiczne osadów przeprowadzono w temperaturze 15,0±0,5°C.

Wartość naprężeń zależała od właściwości reologicznych osadu, prędkości kątowej poruszającego się walca oraz od wymiarów układu pomiarowego. Układ typu Co-tutte'a-Searle'a składał się z dwóch cylindrów pionowych umieszczonych współosiowo jeden w drugim, z wirującym cylindrem wewnętrznym. Szerokość szczeliny pomiarowej wiskozymetru musi zapewnić laminarny ruch warstw badanego medium. Z tego względu podaje się, że rozmiar szczeliny powinien być 10÷100-krotnie większy od największych cząstek badanego medium [18,20]. W pracy [21] podano, że szczelina ma mieć wymiary 10÷20-krotnie większe od największego wymiaru cząstek, natomiast wg prac [22,23] nie popelnia się dużego błędu, jeśli rozmiar cząstek nie przekracza 1/3 szerokości szczeliny. Równocześnie w pracy [23] przyznaje się, że przy pomiarach cząstek sferycznych w przypadku zawieszin, nawet przy szerokości szczeliny 20-krotnie większej od średnicy cząstek, obserwuje się wpływ na wynik pomiaru. Zauważono, że podczas ścinania w naczyniu pomiarowym płyn porusza się w maksymalnej odległości 10÷15 mm od powierzchni wewnętrznego cylindra. W wykonanych badaniach przyjęto zestaw o proporcjach wymiarów cylindra zewnętrznego do wewnętrznego $R_r/r_r=2,15$ ze szczeliną 18 mm. W przypadku osadów zagęszczonych, w szczególności poddanych rozdrobieniu w procesie dezintegracji, przyjęta geometria zapewniła wymagany przepływ laminarnych warstw osadu.

Uzyskane w pomiarach parametry modelu potęgowej odnoszą się do wartości szybkości ścinania wyznaczonej w przypadku cieczy newtonowskiej (stosowanej do kalibracji wiskozymetru). Szybkość ścinania w przypadku płynu nienewtonowskiego przy szerokości szczeliny $S>1,2$ wyznaczyć można z zależności podanej w pracy [24], gdzie skorygowana rzeczywista szybkość ścinania na ścianie obracającego się cylindra ($\dot{\gamma}_K$) określana jest ze wzoru:

$$\dot{\gamma}_K = \left(\frac{2\omega}{n} \right) \left(\frac{S^{2n}}{S^{2n} - 1} \right) \quad (2)$$

w którym:

ω – prędkość kątowa obracającego się cylindra, rad/s

S – stosunek promienia zewnętrznego do wewnętrznego cylindra ($S=R_r/r_r$)

n – współczynnik nachylenia prostej wykresu zależności momentu skręcającego (M) od częstości obrotów (N) w układzie logarytmicznym (w przypadku płynu potęgowej równy jest wskaźnikowi płynięcia n)

Znając wartość wskaźnika płynięcia (n), drugi parametr modelu potęgowej – skorygowany wskaźnik konsystencji (k_K), można określić wykorzystując zależność:

$$k_K \dot{\gamma}_K^n = k_N \dot{\gamma}_N^n \quad (3)$$

w której:

$\dot{\gamma}_N$ – pomierzona szybkość ścinania, 1/s

$\dot{\gamma}_K$ – obliczona skorygowana szybkość ścinania, 1/s

k_N – pomierzony wskaźnik konsystencji, Pa·sⁿ

$n^n=n$ – wskaźnik płynięcia

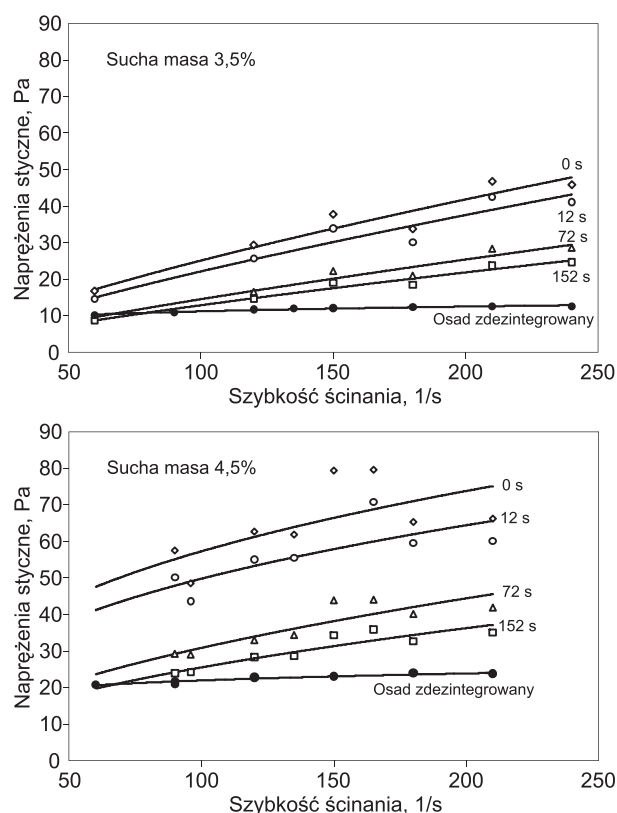
Pomiary reologiczne przeprowadzono w warunkach przepływu laminarnego z pominięciem strefy szybkości ścinania bliskiej zeru, gdzie znaczenie miały naprężenia związane z plastycznym charakterem kłaczków. Zakres przyjętych wartości odpowiadał prędkości przepływu stosowanej w rurociągach do transportu osadów.

Modele reologiczne dobiera się do płynów reologicznie stabilnych. Ciecze tego typu mają stałą lepkość przy ustalonej szybkości ścinania w warunkach izotermicznych [25]. Sflokulowane osady o silnym charakterze tiksotropowym nie są płynami reostabilnymi. Aby móc przeprowadzić obliczenia hydrauliczne w przypadku cieczy tego typu, należy wyznaczyć parametry reologiczne uwzględniając ich zmianę w czasie. Określając w osobnym pomiarze każdy punkt na wykresie reogramu, wyznaczony w tych samych odstępach czasu od rozpoczęcia badania, uzyskuje się zestawy punktów charakteryzujących płyn w danym momencie od początku ścinania. W ten sposób otrzymano serię reogramów, w oparciu o które wyznaczono krzywe reologiczne.

Dyskusja wyników

Wykonane badania wykazały możliwość poprawy warunków płynięcia zagęszczonych osadów z oczyszczania wody. W tabeli 1 przedstawiono wartości parametrów modelu reologicznego Ostwalda-de Waele'a w przypadku osadów wyłącznie zagęszczonych oraz poddanych dezintegracji mechanicznej w warunkach laboratoryjnych.

Podane w tabeli 1 wyniki wskazują na istotne zmiany parametrów płynięcia osadu. Obrazowo przedstawia to rysunek 1, na których znajdują się krzywe płynięcia osadu zagęszczonego oraz osadu dezintegrowanego przy zawartości suchej masy 3,5% i 4,5%. W przypadku osadu wyłącznie zagęszczzonego zauważalne było zmniejszenie naprężeń stycznych podczas ścinania w reometrze. Osad zdeintegrowany uległ całkowitej reodestrukcji i podczas ścinania nie zmieniły się jego parametry reologiczne.



Rys. 1. Reogramy osadu zagęszczzonego ścinanego (w czasie 0, 12 s, 72 s i 152 s) i osadu zdeintegrowanego
Fig. 1. Rheogram for thickened sludge (shear time: 0, 12 s, 72 s and 152 s) and disintegrated sludge

Tabela 1. Parametry reologiczne osadu pokoagulacyjnego (zagęszczzonego i zdeintegrowanego)
Table 1. Rheological properties of coagulation sludge (thickened and disintegrated)

Próbka	Zawartość suchej masy, %	Czas ścinania s	Parametry modelu reologicznego Ostwalda-de Waele'a		
			wskaźnik płynięcia (n)	wskaźnik konsystencji (k_N), Pa·s ⁿ	
				nieskorygowany	skorygowany
Osad zagęszczony	3,5	0	0,736	0,85	1,33
		12	0,762	0,66	1,07
		72	0,803	0,36	0,62
		152	0,761	0,39	0,63
	4,0	0	0,648	2,09	2,92
		12	0,633	2,00	2,74
		72	0,626	1,28	1,74
		152	0,574	1,36	1,73
	4,5	0	0,367	10,52	10,65
		12	0,374	8,86	9,03
		72	0,530	2,66	3,22
		152	0,510	2,37	2,80
Osad zdeintegrowany	3,5	–	0,148	5,71	5,03
	4,0	–	0,141	8,17	7,19
	4,5	–	0,104	13,44	11,85

płynów o modelu potęgowym uogólnioną liczbę Reynoldsa (Re_N) określa się wzorem [22]:

$$Re_N = \left(\frac{d_r^n v_r^{2-n} \rho}{8^{n-1} k} \right) \left(\frac{4n}{3n+1} \right)^n \quad (4)$$

w którym:

d_r – średnica wewnętrzna rury, m

v_r – średnia prędkość przepływu w rurociągu, m/s

ρ – gęstość osadu, kg/m^3 (w przypadku osadów zagęszczonych – 1010÷1025 kg/m^3)

k, n – parametry modelu reologicznego Ostwalda-de Waele'a

Ze względu na lepkość osadu zagęszczonego, jego przepływ w rurociągach odbywa się w obszarze laminarnym. Warstwa laminarna tłoczona osadu pokrywa nierówności ścian wewnętrznych rur, dlatego ich szorstkość nie wpływa na straty ciśnienia podczas przepływu, a warunki przepływu oblicza się jak w rurach o ścianach gładkich [26]. Znajac parametry modelu reologicznego oraz zakładając natężenie przepływu i średnicę rurociągu, można obliczyć średnią prędkość przepływu oraz straty liniowe na jego długości. Średnią prędkość przepływu w rurze (v_r) wyznacza się ze wzoru:

$$v_r = \frac{4Q}{\pi d_r^2} \quad (5)$$

w którym:

Q – objętościowe natężenie przepływu osadu w rurze, m^3/s

d_r – średnica wewnętrzna rury, m

Współczynnik tarcia Fanninga (f) określa stosunek naprężeń ścinających na ściankach rury do energii kinetycznej na jednostkę objętości cieczy. Podczas przepływu laminarnego w rurociągu określa się go ze wzoru [24]:

$$f = \frac{16}{Re_N} \quad (6)$$

Straty liniowe podczas przepływu w rurociągu oblicza się z bilansu określonego równaniem Bernoulliego. Stratę ciśnienia przy przepływie w rurze oblicza się z następującej zależności [24]:

$$\Delta p_l = \frac{2f v_r^2 L \rho}{d_r} \quad (7)$$

w której:

Δp_l – strata ciśnienia na długości rurociągu, Pa

L – długość odcinka rury, m

v_r – prędkość przepływu w rurze, m/s

d_r – średnica wewnętrzna rury, m

ρ – gęstość osadu, kg/m^3

Podczas przepływu laminarnego w rurociągu uwzględnia się również ciśnienie dynamiczne (p_d) obliczone ze wzoru [24, 26]:

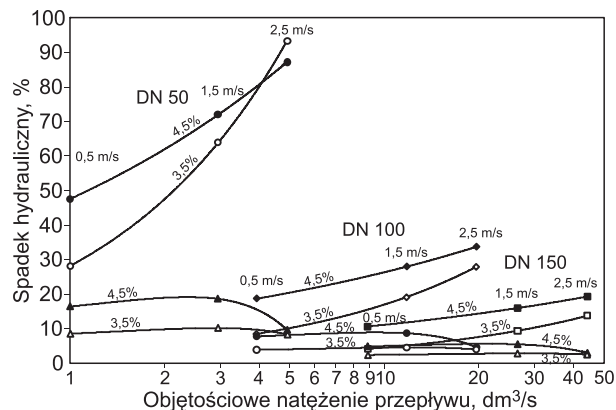
$$p_d = \frac{v_r^2 \rho}{\alpha} \quad (8)$$

w którym:

α – współczynnik korygujący, który w przypadku przepływu laminarnego określa się z zależności:

$$\alpha = \frac{2(2n+1)(5n+3)}{3(3n+1)^2} \quad (9)$$

W celu pokazania możliwości zastosowania mieszania dezintegrującego do upłynienia osadu, przedstawiono obliczone zależności straty ciśnienia od przepływu w przypadku rurociągów o różnej średnicy. Stratę ciśnienia na jednostkowej długości rury podano jako spadek hydrauliczny ($J, \%$). Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Jednostkowe straty liniowe podczas przepływu osadu zagęszczonego (górne pary krzywych) i zdeintegrowanego (dolne pary krzywych) w rurociągach o średnicy 50+150 mm
Fig. 2. Unit/Specific linear losses during flow of thickened sludge (upper pairs of curves) and disintegrated sludge (lower pairs of curves) in pipes of 50–150 mm diameters

Długość wyznaczonych krzywych odpowiadała zakresowi prędkości przepływu od 0,5 m/s do 2,5 m/s. Wartości przedstawione na tym rysunku wykazały znaczące zmniejszenie liniowych strat przepływu w rurociągu osadów zdeintegrowanych. Upłynienie osadów zdeintegrowanych spowodowało, że przy prędkości powyżej 1,5 m/s przepływ miał charakter burzliwy.

Podsumowanie

Analiza parametrów reologicznych modelu potęgowe Ostwalda-de Waele'a wykazała wpływ mieszania na wskaźniki konsystencji i płynięcia osadu. Wskutek zastosowanej dezintegracji nastąpiła poprawa warunków płynięcia osadu, a mieszanie dezintegrujące sprawdziło się jako metoda przeróbki dobrze zagęszczonych osadów i może być stosowane w zakładach oczyszczania wody. Poprawa właściwości reologicznych jest szczególnie istotna w przypadku projektowania i eksploatacji urządzeń i rurociągów związanych z tłoczeniem osadów, jak też procesu mieszania osadów w zbiornikach. Zmniejszenie oporów przepływu osadu w rurociągu ogranicza nakłady energetyczne na transport, wpływając na wydłużenie czasu pracy pomp i mieszadeł w ciągu przeróbki osadów.

Szczególne znaczenie w przypadku właściwości reologicznych zagęszczonych osadów miał udział suchej masy. Ze względu na warunki pracy urządzeń do transportu i mieszania osadów, przy ustalaniu parametrów ich pracy należy określić dopuszczalne wartości suchej masy w procesie zagęszczania. Wyznaczenie wartości granicznych suchej masy osadu wymaga wykonania pomiarów reologicznych oraz obliczenia strat przepływu w rurociągach i ocenę warunków mieszania w komorach. Wprowadzenie mieszania dezintegrującego do ciągu przeróbki osadów umożliwia zastosowanie większego stopnia ich zagęszczania i następnie zmniejszenie ich lepkości za pomocą dezintegracji przed dalszą utylizacją.

LITERATURA

1. Ł. FUKAS-PŁONKA, I. PŁONKA, M. JANIK, A. PŁONKA: Rozwiązanie problemu popłuczyn i osadów w zakładzie produkcji wody „Dzieńkowice”. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”, PZITS Oddział Wielkopolski, Zakopane 2006, t. 2, ss. 129–138.

2. A.L. KOWAL, M. ŚWIDERSKA-BRÓŹ: Oczyszczanie wody. Podstawy teoretyczne i technologiczne, procesy i urządzenia. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2009.
3. Ł. FUKAS-PŁONKA, K. KUŚ, E. ZIELEWICZ-MADEJ: Badania nad możliwością odwadniania i usuwania osadów z wód popłucznych. *Ochrona środowiska* 1999, vol. 21, nr 4, ss. 65–68.
4. J. ŁOMOTOWSKI, J. WIERICIK: Zastosowanie napowietrzania do poprawy skuteczności sedymentacji zawieszin powstających podczas oczyszczania wód podziemnych. *Ochrona środowiska* 2009, vol. 31, nr 4, ss. 21–24.
5. M.M. SOZAŃSKI: Technologia usuwania i unieszkodliwiania osadów z uzdatniania wody. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1999.
6. K. KUŚ, G. KOŹMIŃSKI: Zastosowanie pulsatorów do oczyszczania popłuczyn. *Ochrona środowiska* 1993, vol. 15, nr 4, ss. 65–67.
7. I. PŁONKA, K. BARBUSIŃSKI: Charakterystyka osadów pokoagulacyjnych. *Instal* 2007, nr 10, ss. 65–69.
8. B. FALKUS, A. HANDZLIK, E. POWĄZKA: Biologiczne aspekty oczyszczania wód popłucznych w akcelatorze. *Ochrona środowiska* 2000, vol. 22, nr 2, ss. 31–33.
9. J. BIEN, M. KOWALCZYK, T. KAMIZELA: Preparowanie osadów pokoagulacyjnych przed odwadnianiem na wirówkach. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”, PZITS Oddział Wielkopolski, Poznań 2004, t. I, ss. 455–463.
10. V. LOTITO, L. SPINOSA, G. MININNI, R. ANTONACCI: The rheology of sewage sludge at different steps of treatment. *Water Science and Technology* 1997, Vol. 36, No. 11, pp. 79–85.
11. Z. DYMACEWSKI, J. JEŻ-WALKOWIAK, M.M. SOZAŃSKI: Optymalizacja transportu hydraulicznego osadów z oczyszczania wody i ścieków. *Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN* 2005, vol. 32, t. 1. ss. 1101–1108.
12. A. KOTOWSKI: Analiza hydrauliczna zjawisk wywołujących zmniejszenie przepływności rurociągów. *Ochrona środowiska* 2010, vol. 32, nr 1, ss. 27–32.
13. Z. DYMACEWSKI, J. JEŻ-WALKOWIAK, A. MARLEWSKI, M.M. SOZAŃSKI: Modelowanie właściwości reologicznych osadów z uzdatniania wody. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”, PZITS Oddział Wielkopolski, Poznań 2004, t. I, ss. 503–516.
14. E. ZIELEWICZ-MADEJ, Ł. FUKAS-PŁONKA: Zagęszczanie i kondycjonowanie osadów. Mat. sem. „Podstawy oraz praktyka przeróbki i zagospodarowania osadów”, Kraków 1998, ss. 6.1–6.26.
15. I.SEYSSIECQ, J.-H. FERRASSE, N. ROCHE: State-of-the-art: Rheological characterization of wastewater treatment sludge. *Biochemical Engineering Journal* 2003, Vol. 16, pp. 41–56.
16. H.C. HONEY, W.A. PRETORIUS: Laminar flow pipe hydraulics of pseudoplastic-thixotropic sewage sludges. *Water SA* 2000, Vol. 26, No. 1, pp. 19–26.
17. J.-C. BAUDEZ, A. AYOL, P. COUSSOT: Practical determination of rheological behaviour of pasty biosolids. *Journal of Environmental Management* 2004, Vol. 72, pp. 181–188.
18. Z. KEMBŁOWSKI: Reometria płynów nienewtonowskich. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1973.
19. J. FERGUSON Z. KEMBŁOWSKI: Reologia stosowana płynów. Marcus, Łódź 1995.
20. R.P. CHHABRA, J.F. RICHARDSON: Non-Newtonian Flow and Applied Rheology. Engineering Applications. Elsevier Ltd. Butterworth-Heinemann, 2008.
21. S. CZABAN: Wyznaczanie parametrów hydrotransportu rurowego reostabilnych mieszanin dwufazowych. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej nr 60, Wrocław 1987.
22. J.F. STEFFE, C.R. DAUBERT: Bioprocessing pipelines: Rheology and analysis. Freeman Press, East Lansing 2006.
23. R.L. POWELL: Rotational viscometry. In: *Rheological Measurement*. Elsevier, London 1988, pp. 247–296.
24. J.F. STEFFE: *Rheological Methods in Food Process Engineering*. Freeman Press, East Lansing 1996.
25. PN-86/C-81555. Oznaczanie własności reologicznych przy użyciu wiskozymetrów rotacyjnych, 1986.
26. R. KOCH, A. NOWORYTA: Procesy mechaniczne w inżynierii chemicznej. WN-T, Warszawa 1998.

Janik, M., Kus, K. Analyzing the Possibility of Improving the Parameters of Hydraulic Transport for Sludge Generated During Water Treatment. *Ochrona Środowiska* 2011, Vol. 33, No. 3, pp. 53–57.

Abstract: Water treatment plants produce large volumes of sludge that requires thickening prior to utilization. The use of mixing is recommendable during sludge processing, since this causes the particles of the mechanically thickened sludge to disintegrate, and consequently changes favorably its rheological properties. Within the scope of the study reported on in this paper determined were the rheological properties of coagulation sludge, which was mechanically thickened (3.5–4.5% of dry solids content) and additionally subjected to mechanical disintegration.

Rheological parameters were determined by viscosimetry, using the Ostwald-de Waele model. Measurements were performed in a rotational rheometer, using methods adapted to flocculated sludge with thixotropic properties. It has been demonstrated that the flow curve of the sludge was strongly influenced by the dry solids content and mixing conditions. The disintegration of the sludge significantly reduced friction losses during flow in the pipeline. The variable properties of the sludge, as well as the equally variable mixing conditions, substantiate the necessity of an individual approach to the disintegration process and to the computation of thickened sludge flow in the pipeline.

Keywords: Water treatment sludge, rheological properties, mechanical disintegration, sludge mixing.