

Zbysław Dymaczewski, Edward S. Kempa,
Marek M. Sozański*

KOAGULACJA JAKO STRUKTUROTWÓRCZY PROCES SEPARACJI W OCZYSZCZANIU WODY I ŚCIEKÓW

SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

Zgłoszony temat dotyczy w swojej istocie poznania związków przyczynowo - skutkowych pomiędzy procesem koagulacji, a właściwościami struktury kłaczkowatej powstających w tym procesie zawieszin i osadów. Istniejący stan wiedzy pozwala bowiem na sformułowanie następującej tezy przewodniej niniejszej pracy: **Podstawowe czynniki i zjawiska decydujące o efektach i mechanizmie procesu koagulacji domieszek wód i ścieków decydują również o właściwościach struktury powstających kłaczków (flokul), a także o parametrach i efektach grawitacyjnego zagęszczania i mechanicznego odwadniania struktury tych kłaczków.**

Teza ta stawia powyższy temat na pograniczu fizyki i chemii koloidów oraz reologii, sugerując przydatność eksperymentów tych dyscyplin w technologii wody i ścieków. Koagulacja jest naturalnym i termodynamicznie uzasadnionym procesem łączenia się cząstek koloidalnych i frakcji podkoloidalnych w makroskopowe kłaczkowate struktury. Przebieg i efekty tego procesu zależą od szeregu czynników (AWWA, 1990; Parfitt, 1969;

* Zbysław DYMACZEWSKI, Marek M. SOZAŃSKI - Politechnika Poznańska
Edward S. KEMPA - Politechnika Zielonogórska

Verwey i Overbeek, 1948), które można usystematyzować w cztery następujące grupy:

- **skład i właściwości koagulowanych domieszek**, a więc zarówno cząstek i makrocząsteczek, które znajdują się w wodzie i ściekach przed koagulacją, jak i tych, które wprowadzamy do układu w postaci koagulantów, flokulantów lub innych reagentów;
- **charakterystyka transportu masy** wywołanego zarówno dyfuzją cząsteczkową, jak i procesem mieszania układu w fazie flokulacji;
- **właściwości roztworu wody** z uwzględnieniem zawartości wody grawitacyjnie wolnej oraz wody związanej fizyko-mechanicznie i fizykochemicznie;
- **relacji sił międzycząsteczkowych przyciągających i odpychających** działających między koagulowanymi cząsteczkami.

Czynniki te decydują o mechanizmie i efektach koagulacji, a zgodnie z postawioną tezą również o właściwościach powstających w tym procesie struktur kłaczkowatych. Omówienie tych związków i zależności stanowiących doświadczalne potwierdzenie sformułowanej tezy stanowi cel niniejszej pracy.

FIZYKOCHEMICZNE ASPEKTY ZADANIA

Ocenę **składu i właściwości koagulowanych domieszek** w aspekcie istniejących klasyfikacji układów koloidalnych (Benefield i inni, 1982; Pigoń i Rózewicz, 1980) przedstawiono w Tablicy 1. Klasyfikacja ta, jak każda inna, nie jest zupełnie jednoznaczna (ostra), tym nie mniej wskazuje na istnienie relacji, według której czynniki i zjawiska, które w największym stopniu utrudniają koagulację i obniżają jej efekty, prowadzą także do maksymalnego zwiększenia lepkości granicznej roztworu wody lub ścieków. Największy wzrost lepkości powodować będą koloidy makrocząsteczkowe silnie solwatacyjne, one też są bardzo trudne do skoagulowania (AWWA, 1990; Kucharski i Moniuszko, 1967). Wysoką efektywność koagulowania takich domieszek zapewniają wysokie dawki odpowiednio dobranych koagulantów, korekta odczynu oraz wspomaganie procesu poprzez dawkowanie flokulantów, najczęściej wysokocząsteczkowych polielektrolitów.

Prowadzi to do powstawania struktur kłaczkowatych o dużej powierzchni właściwej, znacznej zdolności sorbcyjnej i dużym powinowactwie do cząsteczek wody (Bałdyga-Jankowska i Sozański, 1977; Sozański i inni, 1987). W konkluzji tych faktów czynniki, które utrudniają koagulację i wpływają na wzrost lepkości roztworów wody i ścieków można uznać za prekursorsy nienewtonowskich właściwości struktur pokoagulacyjnych.

TABLICA 1

Charakterystyka koagulowanych domieszek wód i ścieków

Rodzaj koagulowanych domieszek	Klasyfikacja domieszek						
	fazowe	makrocząsteczkowe	asocjacyjne	hydrofobowe	hydrofilowe	mineralne	organiczne
cząstki gliny	+			+		+	
cząstki minerałów ilastych	+				+	+	
substancje humusowe		+			+		+
substancje pochodzenia org. (białka, węglowodany, pigmenty...)		+			+		+
mydła, detergenty			+	+			+
wodorotlenek glinowy, żelazowy	+				+	+	
węglan wapnia i wodorotlenek magnezu	+			+		+	
flokulanty nieorganiczne (bentonit, ziemia Fullera...)	+			+		+	
krzemionka aktywowana	+			+		+	
polielektrolity		+			+		+

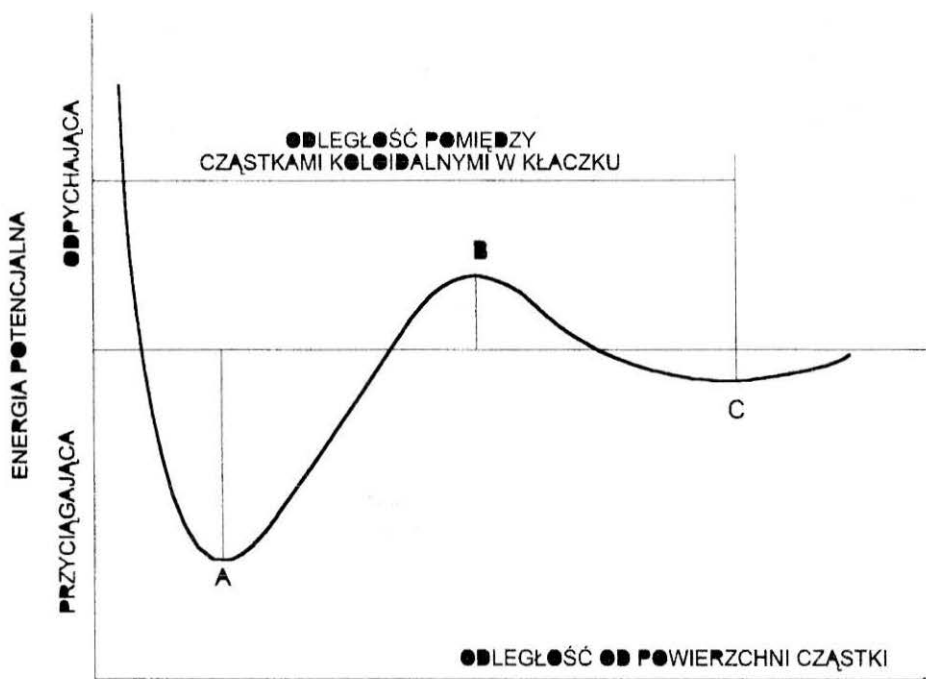
Dobór parametrów transportu masy w komorach flokulacji dostosowany do rodzaju koagulantu i flokulantów i składu domieszek

wody lub ścieków posiada istotny wpływ na efekty procesu koagulacji, jak i na właściwości powstającej struktury pokoagulacyjnej. Podstawowe koagulanty w oczyszczaniu wody i ścieków to siarczan glinowy i siarczan żelazowy. Dawkowane do wody koagulanty, w wyniku dysocjacji i hydrolizy, tworzą szereg hydrokompleksów, które w procesach asocjacji i adsorpcji łączą się wraz z domieszkami wody i flokulują w postaci kłaczków. Podczas tworzenia się struktury kłaczków obserwuje się wyraźną przewagę transportu masy tych jonów i hydrokompleksów nad szybkością z jaką tworzą one strukturę krystaliczną. Ta relacja jest przyczyną amorficznej (bezpostaciowej) struktury kłaczków, a w konsekwencji ich znacznej powierzchni właściwej i bardzo dużego uwodnienia (Pampuch, 1988).

Woda z racji swoich specyficznych właściwości fizykochemicznych jest rozpatrywana jako aktywny współuczestnik właściwości struktury pokoagulacyjnej, a nie jako element bierny. Na skutek specyficznej geometrii i właściwości elektrycznych, cząsteczka wody może tworzyć związki kompleksowe za pomocą wiązań koordynacyjnych za pośrednictwem tlenu jako donora elektronów. Na powierzchni koagulowanych domieszek (cząstki koloidalne, makrocząsteczki) dipole wodne oraz spolaryzowane cząsteczki tworzą strefę graniczną różniącą się składem i właściwościami od masy wody grawitacyjnie wolnej. Ta warstewka wody otaczająca koagulowane domieszki usztywnia struktury pokoagulacyjne na odległość równą setkom i tysiącom średnic cząsteczek wody poprzez zmniejszenie amplitudy drgań termicznych (Grim, 1969). Pojęcie struktury kłaczków związane jest zarówno z przestrzennym rozmieszczeniem koagulowanych cząstek w kłaczkach, jak i z siłami działającymi między tymi cząstkami. Energia oddziaływania między cząstkami w kłaczkach zależy od efektu wspólnego działania sił van der Waalsa - Londona i potencjału warstw podwójnych. Superpozycja energii przyciągania i odpychania, przedstawiona schematycznie na rys. 1, określa najbardziej statyczne wzajemne położenie cząstek w kłaczkach, któremu odpowiada maksymalna wytrzymałość ich struktury. Występujące na krzywej minima, jedno głębokie dla małych odległości, drugie płytkie dla dużych odległości, określa położenia, w których wypadkowa energia wiązania cząstek w strukturze kłaczków osiąga wartość maksymalną. Oddzielające te minima maksimum określa wielkość bariery energetycznej przeciwdziałającej zbliżaniu się cząstek w kłaczkach na odległość określoną

pierwszym minimum. Koagulacja jest wynikiem działania drugiego minimum, przez co cząstki koaguluja łącznie z otaczającymi je warstewkami wody. Powstające w tych warunkach struktury kłaczkowate charakteryzują się brakiem bezpośrednich kontaktów pomiędzy tworzącymi je cząstkami fazy stałej oraz znaczną zawartością wody przekraczającą masowo 90%.

Rys.1. Krzywa energii potencjalnej oddziaływania cząstki koloidalnej.



BADANIA WŁAŚCIWOŚCI STRUKTURY POKOAGULACYJNEJ

Badaniami objęto właściwości struktury zawiesin i osadów pokoagulacyjnych powstających w kilku zakładach wodociągowych w Polsce stosujących proces koagulacji siarczanem glinowym. Wstępne charakterystyki badanych struktur pokoagulacyjnych przedstawiono w tablicy 2.

TABLICA 2

Skład i właściwości badanych zawiesin pokoagulacyjnych

Zakład wodociągowy	Skład „jakościowy” koagulowanych domieszek	Skład chemiczny fazy stałej flokuł	Gęstość flokuł
-	-	%	kg/m ³
Tomaszów Mazowiecki	Al(OH) ₃ mętność: 15-65 g/m ³ barwa: 20-60 g Pt/m ³ zawiesina: 10-30 g/m ³	straty prażenia: 22,91 pozostałość po prażeniu: 77,09 w tym: SiO ₂ 41,43 Al ₂ O ₃ 24,85 Fe ₂ O ₃ 3,83 CaO 2,44 MgO 0,1 inne związki 3,73	1005
Wrocław "Na Grobli"	Al(OH) ₃ mętność: 5-25 g/m ³ barwa: 10-30 g Pt/m ³ zawiesina: 0-5 g/m ³ zw. żelaza: 0,5-2,0 g Fe/m ³ zw. manganu: 0,3-0,7 g Mn/m ³	straty prażenia: 8,81 pozostałość po prażeniu: 91,19 w tym: SiO ₂ 26,71 Al ₂ O ₃ 32,15 Fe ₂ O ₃ 28,41 CaO 1,97 MgO 0,51 inne związki 1,98	1008
Szczecin "Pomorzany"	Al(OH) ₃ mętność: 10-25 g/m ³ barwa: 30-50 g Pt/m ³ zawiesina: 15-40 g/m ³	straty prażenia: 0,65 pozostałość po prażeniu: 89,35 w tym: SiO ₂ 63,95 Al ₂ O ₃ 8,17 Fe ₂ O ₃ 5,60 CaO 4,50 MgO 2,30 inne związki 4,83	1014

Struktura pokoagulacyjna klasyfikuje się do układów spójnych i jednorodnych. Ta spójność i jednorodność jest makroskopową cechą struktur pokoagulacyjnych, natomiast badania mikroskopowe ujawniają drobno-dyspersyjny charakter struktury, w której skoagulowane cząstki są ułożone w sposób uporządkowany. Stopień dyspersji badanych struktur pokoagulacyjnych określono doświadczalnie wyznaczając wielkość powierzchni właściwej przez pomiar izoterm sorpcji CO₂ i C₆H₆ w wysoko- próżniowej aparaturze grawimetrycznej według metody przedstawionej w pracach: Bałdyga-Jankowska i Sozański, 1977; Sozański i inni, 1987. Wyniki pomiarów aproksymowano za pomocą równania DR (Dubinina - Radszkiewicz) i równania BET, a wyniki przedstawiono w tabelicy 3.

TABLICA 3

*Powierzchnia właściwa osadów
pokoagulacyjnych z wybranych zakładów wodociągowych w Polsce*

Zakład wodociągowy	Powierzchnia właściwa [m ² /g] wg równania:	
	DR	BET
Wrocław "Na Grobli"	253,4	131
Tomaszów Mazowiecki	80,3	50
Szczecin "Pomorzany"	31,8	24

Wartości przedstawione w tabelicy 3 określają powierzchnię właściwą S₀ wysuszonych osadów pokoagulacyjnych, tzn. fazy stałej struktury pokoagulacyjnej wyznaczonej w oparciu o jej zdolność do sorbowania CO₂ i C₆H₆. Wartości te przeliczone na struktury pokoagulacyjne w stanie uwodnionym, tzn. o uwodnieniu - U określa równanie (1):

$$S_U = S_0 \left(1 - \frac{U}{100} \right) \quad (1)$$

Wyznaczone powierzchnie właściwe - S₀ struktur pokoagulacyjnych (Tabl.3) wyraźnie zależą od zawartości w fazie stałej tych struktur tlenków żelaza i glinu (Tabl.2):

$$S_0 = f([Al_2O_3], [Fe_2O_3], \dots) \quad (2)$$

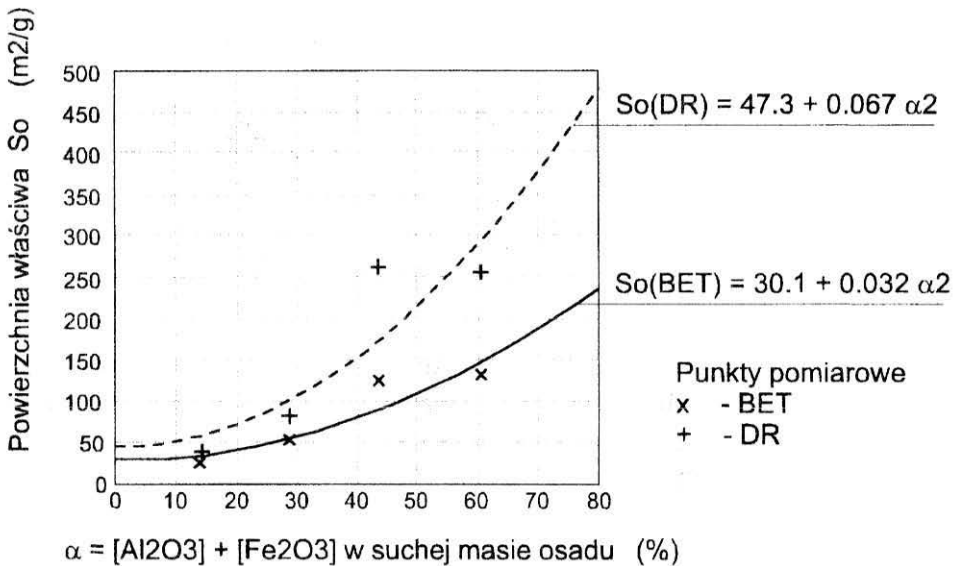
Szczegółowe postacie równania (2) przedstawiają wzory (2.1) i (2.2):
dla S_0 określone wg izotermy DR

$$S_{0_{DR}} = 47,3 + 0,067 \left([Al_2O_3] + [Fe_2O_3] \right)^2, \quad (2.1)$$

dla S_0 określone wg izotermy BET

$$S_{0_{BET}} = 30,1 + 0,032 \left([Al_2O_3] + [Fe_2O_3] \right)^2. \quad (2.2)$$

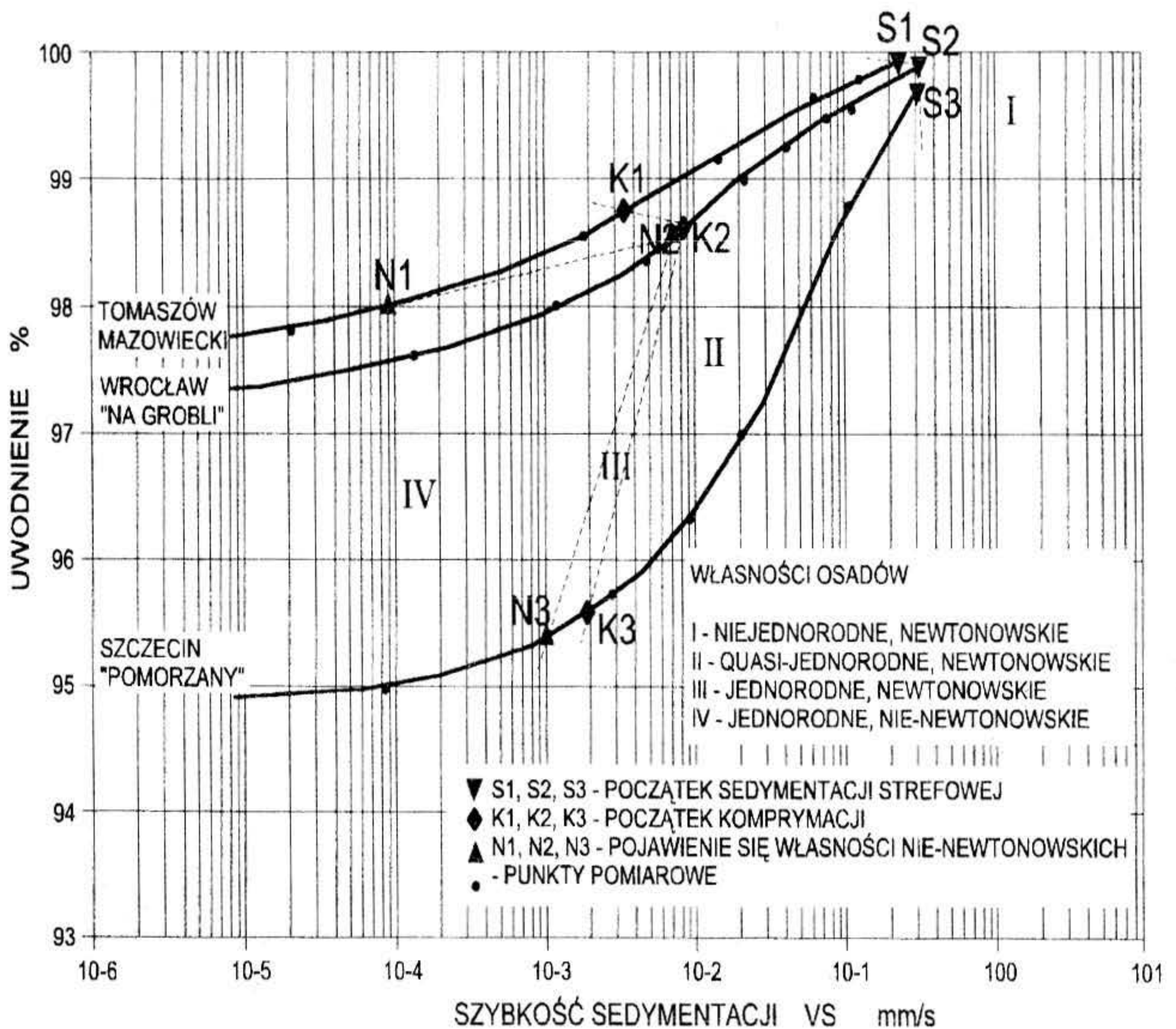
Zależności (2.1) i (2.2) wskazują na istotny wpływ zawartości $[Al_2O_3]$ i $[Fe_2O_3]$ na właściwości struktury pokoagulacyjnej. Powyższe zależności przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Zależność powierzchni właściwej kłaczków od zawartości w nim tlenków Fe i Al.

Właściwości te posiadają decydujący wpływ na procesy sedymentacji kłaczków, grawitacyjnego zagęszczania i mechanicznego odwadniania struktur pokoagulacyjnych, a także na ich charakterystyki płynięcia. Strefa sedymentacji zawiesiny kłaczkowatej, w której flokuly opadają jak odrębne cząstki określa stężenie objętościowe nie większe od 0,1 + 0,2%.

Przy wyższych stężeniach zanika ruch indywidualnych flokuł i cała zawiesina zaczyna sedymentować strefowo (Sozański i Parzonka, 1992). Charakterystyczną cechą sedymentacji strefowej jest występowanie płaszczyzny rozdziału pomiędzy górną strefą wody sklarowanej, a strefą sedymentującej zawiesiny. Prędkość opadania tej płaszczyzny rozdziału określa prędkość sedymentacji strefowej. Zależność pomiędzy prędkością sedymentacji, a uwodnieniem dwufazowych układów pokoagulacyjnych przedstawiono na rys.3.



Rys.3. Klasyfikacja zawiesin i osadów pokoagulacyjnych.

Krzywe $v_s = f(U)$ przyporządkowują prędkości sedymentacji określonym uwodnieniom dla przebadanych układów pokoagulacyjnych z trzech zakładów wodociągowych. Skład i właściwości tych układów

przedstawiono w tablicy 2. Na krzywe $v_s = f(U)$ naniesiono także punkty określające:

- początek sedymentacji strefowej S,
- początek komprymacji układu K,
- pojawienie się właściwości nienewtonowskich N.

Tym samym wyznaczono strefy występowania w tych układach charakterystycznych właściwości ich płynięcia w rurach.

Na rys. 3 wyszczególniono cztery następujące strefy klasyfikujące układy pokoagulacyjne:

- I strefa - zawiesina kłaczkowata, sedymentacja oddzielnych flokuł, układ o właściwościach niejednorodnych i newtonowskich;
- II strefa - zawiesina kłaczkowata, sedymentacja strefowa, układ o właściwościach quasijednorodnych, newtonowskich;
- III strefa - osad pokoagulacyjny, zagęszczanie grawitacyjne, układ o właściwościach jednorodnych, newtonowskich;
- IV strefa - osad pokoagulacyjny, zagęszczanie grawitacyjne, układ o właściwościach jednorodnych nienewtonowskich.

Przy uwodnieniu komprymacji i przy uwodnieniach niższych pojęcie zawiesiny kłaczkowatej, jako mieszaniny flokuł utrzymujących się w zawieszeniu w wyniku działania energii strumienia, traci swój fizyczny sens. W punkcie komprymacji odległości pomiędzy flokułami zawiesiny są równe zero, stąd pojęcie sedymentacji, rozumiane jako opadanie tych flokuł, nie ma fizycznego sensu. Począwszy od uwodnienia komprymacji proces sedymentacji polega już tylko na powolnym grawitacyjnym opadaniu „warstwy” i na zagęszczaniu struktury osadu, podczas którego woda jest wyciskana z tej warstwy. Krzywe zmian prędkości sedymentacji w czasie, po przejściu przez punkt komprymacji, stają się w przybliżeniu równoległe do osi czasu, co oznacza iż prędkość sedymentacji osadu w warunkach stagnacji jest równa zero. Masowy udział wody w punkcie komprymacji jest mimo to bardzo duży, a w badanych układach przedstawionych na rys. 3 wynosił 94,9 - 98,7%. Odpowiadające tym uwodnieniom prędkości grawitacyjnego zagęszczania w warunkach stagnacji wynoszą 1,8 - 8,9 $\mu\text{m}/\text{sek}$. Takie prędkości opadania mają cząstki kwarcu o wielkości 1 - 3 μm , to znaczy cząstki wyznaczające dolny zakres stosowalności prawa Stokesa. W klasyfikacji osadów pokoagulacyjnych istotne jest także określenie wielkości cząstek

ziarnistych, jakie mogą być wbudowane w ich strukturę i z niej uwolnione. W praktyce chodzi głównie o cząstki kwarcu, tj. minerału najczęściej występującego w wodach powierzchniowych. Największe cząstki wbudowane w strukturę badanego osadu nie przekraczają 10 μm . Wielkość cząstek wbudowanych w osad jest funkcją właściwości jego struktury. Jeżeli siły struktury osadu utrzymujące cząstkę ziarnistą w zawieszeniu będą większe od działających na nią sił grawitacji i wyporu hydrostatycznego, wówczas cząstka ta nie wypadnie ze struktury. Bilans tych sił prowadzi do zależności:

$$\delta_{\text{gr}} = \frac{\sigma \tau_0}{g(\rho_s - \rho_c)\varphi} \quad (3)$$

Wzór ten określa wielkość cząstek ziarnistych wbudowanych w amorficzną strukturę osadu. Dla kulistych cząstek kwarcu i wartości granicy płynięcia 0,1 N/m² odpowiadająca wielkość ziarna granicznego wynosi około 40 μm . Wartości te wskazują, iż ziarna kwarcu 10 μm nie powinny wypadać ze struktury osadu nawet podczas przepływu laminarnego.

Wartość powierzchni właściwej - S_0 zawiesiny pokoagulacyjnej posiada istotny wpływ na jej lepkość, co wyraża zmodyfikowana postać wzoru Einsteina (4), stanowiąca wynik przeprowadzonych doświadczeń:

$$\eta_p = \eta [1 + \alpha(100 - 11)], \quad (4)$$

w którym $\alpha = 1,92 \cdot 10^{-3} S_0^{1,46}$.

Równanie (4) określa lepkość badanych zawiesin pokoagulacyjnych w strefie ich właściwości newtonowskich, co ogranicza zakres stosowności tego równania do wartości $U < U_{\text{gr}}$. Równanie zostało wprowadzone dla zakresu temperatur od 273,45 K do 293,15 K. Badania lepkości oraz właściwości nienewtonowskich struktur pokoagulacyjnych prowadzono za pomocą wiskozymetru rotacyjnego Rheotest-2 firmy Prüfgerate - Werk Medingen. W badaniach tych określano wartości naprężeń ścinających na powierzchni cylindra pomiarowego i odpowiadające im prędkości deformacji. Interpretację wyników badań oparto na modelu Newtona:

$$\tau = \eta_p \frac{dv}{dr}, \quad (5)$$

w zakresie newtonowskich właściwości struktur pokoagulacyjnych, oraz na równaniu Kriegera, Elroda, Marona i modelu Bingham (AWWA, 1990):

$$\tau - \tau_0 = \eta_{pl} \frac{dv}{dr}, \quad (6)$$

w przedziale występowania właściwości nienewtonowskich tych struktur. Badania prowadzono dla temperatur 273,45, 283,15 i 293,15 K oraz w szerokim zakresie zmian uwodnień od ok. 84% do 100%.

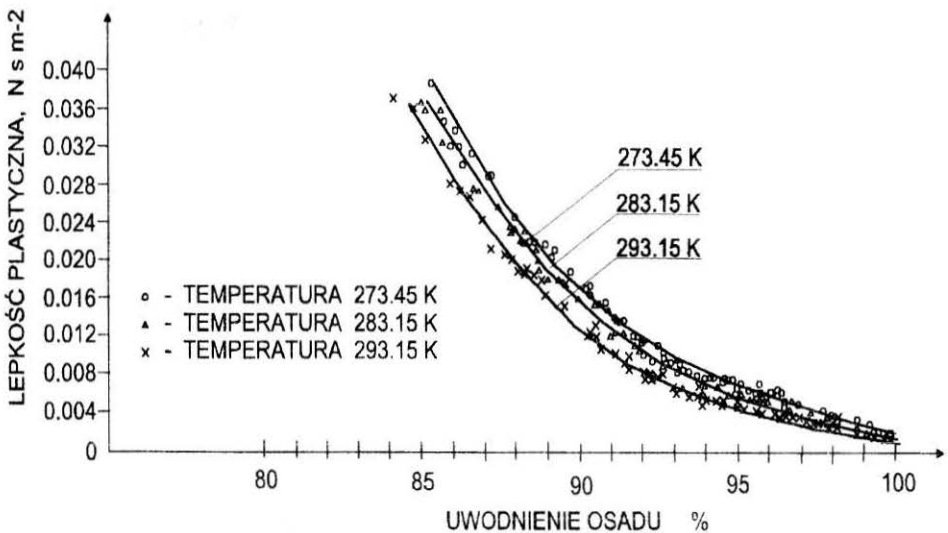
Zbiornicze zestawienie wyników badań przedstawiono w tabelicy 4, a bardziej szczegółowe wyniki dla osadu pokoagulacyjnego z wodociągu w Tomaszowie Mazowieckim podano na rys.4 i rys.5.

TABLICA 4.

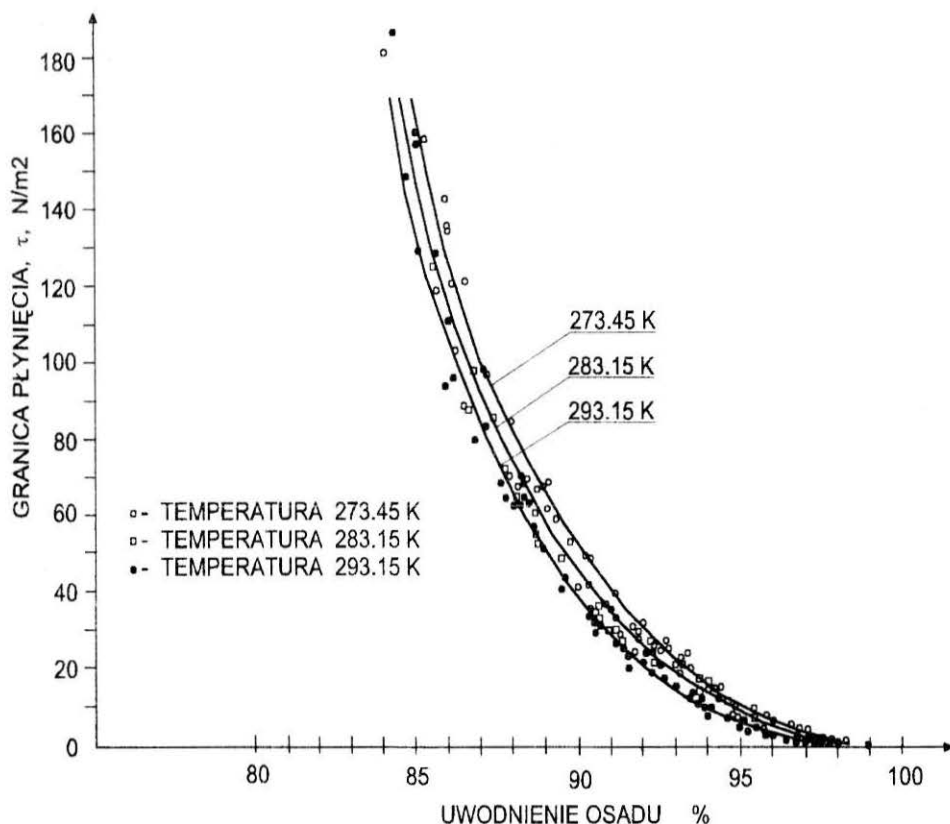
Wartości parametrów reologicznych modelu Bingham badanych struktur pokoagulacyjnych.

POCHODZENIE STRUKTURY POKOAGULACYJNEJ, TEMPERATURA	WARTOŚCI PARAMETRÓW MODELU BINGHAMA: η_{pl} [N·s·m ⁻²] τ_0 [N·m ⁻²]	Współczynnik korelacji	Odchylenie standardowe	Graniczne stężenie fazy stałej c_{sgr}
-	$\eta_{pl} = A \cdot c_s^n$ $\tau_0 = B \cdot c_s^m$	-	-	-
Tomaszów Mazowiecki T=273,45 K	A = 0,4189 n = 1,4084 B = 12295,8 m = 3,1741	0,9894 0,9739	0,2087 0,4797	0,0208 (Ugr = 97,92%) 0,0249 (Ugr = 97,06%)
„Pomorzany” Szczecin T=293,15 K	A = 0,1454 n = 1,6952 B = 973,59 m = 3,1063	0,9832 0,9811	0,3946 0,7245	0,0532 (Ugr = 94,68%) 0,0520 (Ugr = 94,80%)
„Na Grobli” Wrocław T=273,45 K	A = 2,2962 n = 1,6756 B = 416145,1 m = 3,5240	0,9930 0,9815	0,2273 0,4837	0,0140 (Ugr = 98,60%) 0,0132 (Ugr = 98,68%)

Struktury pokoagulacyjne z uwagi na stwierdzone właściwości granicy płynięcia (τ_0), zależnie od wartości działających na nie naprężeń ścinających, mogą być zakwalifikowane do cieczy jak i do ciał stałych. Dla wartości naprężeń stycznych nie przekraczających granicy płynięcia ($\tau < \tau_0$) struktury pokoagulacyjne zachowują się jak ciała stałe, a ich upłynnienie wymaga przyłożenia naprężeń przekraczających wartości granicy płynięcia ($\tau > \tau_0$). Graniczne stężenie fazy stałej, poniżej którego właściwość granicy płynięcia stwierdza się w strukturach pokoagulacyjnych, wyraźnie zależy od składu koagulujących domieszek. Na wodociągu wrocławskim „Na Grobli” (Tablica 4) granicę płynięcia stwierdzono w strukturze pokoagulacyjnej już dla stężenia fazy stałej równego $1,32 \div 1,40\%$, natomiast na wodociągu „Pomorzaný” w Szczecinie wartości te były znacznie większe i wynosiły $5,20 \div 5,32\%$. Wartości te pozostają w relacjach odwrotnie proporcjonalnych do udziału tlenków glinowego i żelazowego w fazie stałej struktury pokoagulacyjnej. Wyniki tych badań wskazują na wodorotlenek glinowy i żelazowy, jako podstawowe składniki fazy stałej struktur pokoagulacyjnych, decydują o wartości granicy płynięcia i lepkości plastycznej.



Rys.4. Wpływ uwodnienia na lepkość plastyczną i pozorną w temperaturach 273,45, 283,15, 293,15 K dla osadów pokoagulacyjnych z Tomaszowa Mazowieckiego.



Rys.5. Wpływ uwodnienia na granicę płynięcia w temperaturach 273,45, 283, , 293,15 K dla osadów pokoagulacyjnychz Tomaszowa Mazowieckiego.

Wyniki te pośrednio wskazują na istnienie zależności pomiędzy właściwościami nienewtonowskimi struktur pokoagulacyjnych, a ich powierzchnią właściwą.

PODSUMOWANIE

Praca przedstawia wyniki badań właściwości struktur pokoagulacyjnych powstających w trzech zakładach wodociągowych. Badania objęły skład chemiczny, powierzchnię właściwą struktur pokoagulacyjnych, procesy ich sedimentacji i grawitacyjnego zagęszczania oraz parametry reologiczne. Faza stała badanych struktur składała się głównie z substancji

mineralnych w szczególności krzemionki, tlenków glinowych i żelazowych. Ten skład chemiczny można uznać za typowy dla większości struktur pokoagulacyjnych powstających w komunalnych zakładach uzdatniania wód powierzchniowych. Stwierdzono, iż czynnikiem decydującym o właściwościach tych struktur jest skład chemiczny fazy stałej, w szczególności zawartość tlenków glinowego i żelazowego. Zawartość tych tlenków decyduje o bardzo znacznej powierzchni właściwej struktur pokoagulacyjnych, a także wpływa istotnie na ich właściwości reologiczne. Wykazano iż właściwości nienewtonowskie „pojawiają się najwcześniej” w strukturach o największej zawartości tlenków glinowego i żelazowego, dla których wartość stężenia granicznego wynosiła około 1,5%. W badaniach sedymentacji i grawitacyjnego zagęszczania wykazano dużą stabilność struktury pokoagulacyjnej w odniesieniu do sił grawitacji. Zawartość wody w badanych strukturach pokoagulacyjnych podczas ich komprymacji nie spadała poniżej 94 ÷ 98%, co oznacza, iż siły grawitacji nie niszczyły tych struktur. Do czynników stabilizujących struktury pokoagulacyjne zaliczamy drobnodispersyjność ich fazy stałej i duże powinowactwo do cząsteczek wody. Z tych względów w zakresie uwodnień mniejszych od uwodnienia komprymacji struktury pokoagulacyjne klasyfikują się do układów quasi-jednorodnych złożonych z dwóch wzajemnie przenikających się ośrodków quasi-ciągłych, tj. roztworu cieczy i zdyspergowanej do frakcji koloidalnych i podkoloidalnych cząstek fazy stałej. Fazy te oddziałują na siebie siłami przyciągania międzycząsteczkowego zaliczanymi do sił objętościowych.

LITERATURA

- [1] **AWWA**, *Water Quality and Treatment*. McGraw-Hill, Inc., New York. 1990.
- [2] **BALDYGA-JANKOWSKA, A., SOZAŃSKI, M. M.**: The Investigation on the Structure of Alum Coagulation Sludge by Adsorption Method. *Environment Protection Engineering* 1-2, Wrocław Technical University Publishing House. 1977.
- [3] **BENEFIELD, L. D., JUDKINS, J. R., WEAND, B. L.**: *Process Chemistry for Water and Wastewater Treatment*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. 1982.

- [4] **GOVIER, G. W., AZIZ, K.:** *The Flow of Complex Mixtures in Pipes*. VNR Co., New York. 1972.
- [5] **GRIM, R. E.:** *Mineralogije i Praktičeskoje Ispolzowanie*. Mir, Moskva. 1967.
- [6] **KUCHARSKI, J., MONIUSZKO, A.:** *Oczyszczanie Wód i Ścieków Przemysłowych Metodą Koagulacji*. WNT, Warszawa. 1967.
- [7] **PAMPUCH, R.:** *Materiały ceramiczne: Zarys nauki o materiałach nieorganiczno-organicznych*. PWN, Warszawa. 1988.
- [8] **PARFITT, G. D.:** *Fundamental Aspects of Dispersion of Powders in Liquids*. Elsevier Publ.Comp., Amsterdam. 1969.
- [9] **PIGOŃ, K., RUZIEWICZ Z.:** *Chemia Fizyczna*. PWN, Warszawa. 1980.
- [10] **SOZAŃSKI, M. M., JANKOWSKA, A., BRONIEK, E.:** *Ocena struktury porowatej i powierzchni właściwej osadów pokoagulacyjnych*. Ochrona Środowiska, Publishing House of PZITS, Wrocław. 1987.
- [11] **SOZAŃSKI, M. M., PARZONKA, W.:** *Hydrauliczne podstawy transportu rurowego zawiesin i osadów pokoagulacyjnych w systemach uzdatniania wody*. Mat. XII Konf. Naukowo-Technicznej nt. "Zaopatrzenie w wodę miast i wsi", Poznań. 1992.
- [12] **VERWEY, E. J. W., OVERBEEK, J. TH. G.:** *Theory of the Stability of Lyophobic Colloids*. Elsevier Publ.Comp., Amsterdam. 1948.