

Stanisław Stryczek*, Rafał Wiśniowski*, Andrzej Gonet*

WPLYW PLASTYFIKATORÓW NA WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNE ZACZYNÓW USZCZELNIAJĄCYCH DO PRAC GEOINŻYNIERYJNYCH**

1. WSTĘP

Wraz z rozwojem infrastruktury (zwłaszcza w dużych aglomeracjach miejskich), grunty budowlane o dobrych parametrach geotechnicznych stają się „towarem” deficytowym. Inwestycje lokalizowane są coraz częściej w miejscach, gdzie ilość problemów geotechnicznych wynikających z trudnych warunków gruntowych jest bardzo duża. Dotyczą one zagadnień posadowienia obiektów, zabezpieczania wykopów, możliwości wystąpienia (uaktywnienia) zjawisk geodynamicznych. Każdy rodzaj inwestycji prowadzonej w takich warunkach posiada własną specyfikę, wszystkie łączy jednak wysoki stopień komplikacji i wymagania stawiane zarówno projektantom, wykonawcom, jaki stosowanym technologiom.

Należy zaznaczyć, że w ostatnich latach technika i technologie związane z modyfikacją gruntów i skał metodami geoinżynierskimi rozwijają się w imponującym tempie.

Występujące w ośrodku gruntowym lub masywie skalnym zagrożenia naturalne spowodowane mogą być [7, 9]:

- skomplikowanymi warunkami geologicznymi i hydrogeologicznymi, w jakich prowadzone są prace iniekcyjne;
- błędami technologicznymi powstałymi w procesie realizacji prac.

Technologie wzmocnienia i uszczelniania gruntów i skał metodami geoinżynierskimi można podzielić ze względu na mechanizm ich oddziaływania na trzy sposoby:

- 1) Mechaniczny** (zagęszczenie ziarn). W metodzie tej wzmocnienie gruntów odbywa się bez konieczności stosowania dodatkowych materiałów wypełniających. Cząstki gruntu ulegają przemieszczaniu względem siebie, co prowadzi do zmniejszenia objętości porów oraz wypieranie z nich wody i gazu.

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

** Pracę zrealizowano w Zakładzie Wiertnictwa i Geoinżynierii na Wydziale WNiG w ramach badań własnych 10.10.190.317

- 2) **Fizykochemiczny.** W metodzie tej istotną rolę odgrywają pewne zjawiska powierzchniowe, jak oddziaływanie elektrostatyczne, adhezja, sorpcja i wiązania wodorowe występujące na powierzchni kontaktu ziaren lub cząstek gruntowych z materiałem wiążącym. Wzmacnianie ośrodka polega na wprowadzeniu w słabsze warstwy gruntu (w przestrzeń międzyziarnową) dodatkowego nieorganicznego materiału lub zaczynu uszczelniającego ograniczając w ten sposób pory ziarnowe na zasadzie kolmatacji lub właściwości wiążących.
- 3) **Chemiczny.** Sposób ten polega na wprowadzeniu w ośrodek gruntowy lub masyw skalny zaczynu uszczelniającego o właściwościach wiążących w środowisku wodno-gruntowym.

2. KRYTERIA DOBORU ZACZYNÓW DO WZMACNIANIA I USZCZELNIANIA GRUNTÓW I SKAŁ

Jednym z najbardziej istotnych czynników – oprócz wyboru optymalnej metody i technologii – wpływających na skuteczność uszczelniania i wzmacniania ośrodka gruntowego i masywu skalnego metodami geoinżynierskimi jest dobór rodzaju oraz optymalnych parametrów technologicznych zaczynu uszczelniającego w funkcji istniejących warunków geologicznych, geotechnicznych i hydrogeologicznych.

Receptury zaczynów uszczelniających (ich parametry technologiczne) muszą uwzględniać przede wszystkim [7]:

- skład petrograficzny i mineralny gruntów i skał przeznaczonych do uszczelniania;
- tektonikę warstw uszczelnianych;
- spękania i szczelinowatości skał;
- parametry wytrzymałościowe gruntów i skał przeznaczonych do uszczelniania lub wzmacniania;
- chłonność warstw przewidywanych do uszczelniania, izolacji i stabilizacji, obecność i skład chemiczny zarówno wód gruntowych, jak i złożowych.

W celu zapewnienia wysokiej skuteczności wykonywanych prac uszczelniających należy stosować zaczyny, które muszą spełniać równocześnie minimum kilka kryteriów.

Pierwszym z nich jest warunek zgodności pod względem fizykochemicznym z otoczeniem. **Drugim** warunek wynika z kryterium przetłaczania zaczynu. Realizuje się go poprzez odpowiedni dobór modelu reologicznego i parametrów reologicznych zaczynu uszczelniającego. Prawidłowo wyznaczone parametry reologiczne umożliwiają bowiem obliczenie oporów przepływu zaczynu w systemie cyrkulacyjnym od agregatów zatłaczających do miejsca jego lokowania.

Znajomość oporów hydraulicznych pozwala na [1, 5, 6, 8, 15]:

- określenie strat ciśnień w układzie cyrkulacyjnym,
- ocenę rozkładu gradientu ciśnienia hydrostatycznego słupa zaczynu uszczelniającego przy jego wtłaczaniu w górotwór,
- projektowanie strumienia objętości tłoczenia zaczynu uszczelniającego zapewniającego właściwe warunki przepływu w górotworze,
- określenie promienia zasięgu rozchodzenia się zaczynu w górotworze.

Trzecim wymogiem jest potrzeba zapewnienia odpowiedniej wytrzymałości oraz trwałości stwardniałych zaczynów uszczelniających, powstałych na skutek procesów fizykochemicznych.

Czwarty warunek powinien uwzględniać czynnik ekonomiczno-ekologiczny. Celem zminimalizowania kosztów związanych z ceną jednostkową zaczynów, można stosować dla odpowiednich warunków zazwyczaj tanie, a niekiedy odpadowe dodatki (np. pucolanowe).

Aby podwyższyć skuteczność zabiegów uszczelniania gruntów i skał w technologiach wiertniczych, prowadzi się badania laboratoryjne umożliwiające określenie wpływu niektórych domieszek i dodatków mineralnych na kształtowanie się właściwości technologicznych zarówno świeżych, jak i stwardniałych zaczynów cementowych.

3. WPŁYW DOMIESZEK UPLYNIAJĄCYCH NA WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNE ZACZYNÓW USZCZELNIAJĄCYCH

Domieszki do zaczynów uszczelniających można podzielić na kategorie według [2]:

- mechanizmu ich oddziaływania na główne składniki zaczynu uszczelniającego,
- składu chemicznego domieszki,
- podstawowego efektu technologicznego uzyskiwanego wskutek zastosowania odpowiedniej domieszki.

Z punktu widzenia praktyki uszczelniania gruntów i skał metodami geoinżynieryjnymi, najbardziej istotne są efekty technologiczne. Jako kryterium zaliczania domieszki do danego rodzaju, przyjmuje się spełnianie przez nią wymagań dotyczących podstawowego efektu działania na świeży i stwardniały zaczyn uszczelniający. W przypadku gdy domieszka modyfikuje wyraźnie więcej niż jedną cechę zaczynu, zalicza się ją do domieszek dwufunkcyjnych (kompleksowych).

Interesujące z punktu widzenia iniekcji są możliwości regulacji właściwości reologicznych zaczynów. Domieszki wypełniające te funkcje można podzielić na [2]:

- domieszki uplastyczniające i upłynniające (superplastyfikatory),
- domieszki zagęszczające,
- domieszki zwiększające ilość wody.

Grupa domieszek redukujących ilość wody, czyli tzw. domieszki reologiczne, obejmująca domieszki uplastyczniające i upłynniające (grupy A, B), stanowi dziś najpowszechniej stosowane chemiczne modyfikatory betonów. Norma PN-EN934-2 definiuje domieszki uplastyczniające, jako: „domieszki, które umożliwiają zmniejszenie zawartości wody w danej mieszance betonowej bez wpływu na jej konsystencję, lub które bez zmniejszenia ilości wody powodują zwiększenie opadu/rozplywu stożka lub wywołują oba efekty jednocześnie”, a dla domieszek upłynniających uzupełnia powyższą definicję słowem „znaczne”, odpowiednio: zwiększenie i zmniejszenie [2, 4].

Z praktycznego punktu widzenia może zachodzić pytanie: gdzie przebiega granica podziału między plastyfikatorami i superplastyfikatorami. Otóż superplastyfikatory zwiększają ciekłość zaczynu uszczelniającego w znacznie większym stopniu niż zwykłe domieszki uplastyczniające lub alternatywnie: umożliwiają zdecydowanie większe zmniejszenie ilości wody zarobowej w zaczynie, co w konsekwencji powoduje wyraźnie większy wzrost wy-

trzymałości stwardniałego zaczynu. To właśnie wielkość tych głównych efektów oddziaływania stanowi kryterium, na podstawie którego daną domieszkę zalicza się do plastyfikatorów lub upłynniaczy.

Przyjęty w normie PN-EN934-2 podział domieszek redukujących ilość wody wyróżnia grupę domieszek uplastyczniających (A), tzw. plastyfikatory, oraz grupę upłynniających (B), tzw. superplastyfikatory.

Grupa domieszek uplastyczniających (PL), wprowadzonych najwcześniej, bo jeszcze w latach 30. XX wieku, obejmuje [4]:

- sole kwasów lignosulfonowych,
- kwas hydroksykarboksylowy,
- polimery hydroksylowe,
- nonylofenyle oksyetylowe.

Skuteczność ich działania, ocenianą na podstawie redukcji wody, określa się na poziomie 5÷15% [4]. W grupie upłynniaczy (SP) znajdują się domieszki takie, jak:

- sulfonowane kondensaty melaminowo-formaldehydowe,
- sulfonowane kondensaty naftalenowo-formaldehydowe,
- modyfikowane lignosulfoniany,
- estry kwasu sulfonowego i węglowodorów.

Skuteczność ich działania ocenianą na podstawie redukcji wody określa się na poziomie 10÷25% [6].

W latach 90. XX wieku wprowadzone zostały szczególnie efektywne domieszki tzw. trzeciej generacji (KAE) na bazie:

- polikarboksylanów (akrylany),
- eteru karboksylowego.

Efektywność redukcji wody w mieszance betonowej przez tę grupę upłynniaczy (zwaną super superplastyfikatorami) określa się na poziomie 20÷40% [4].

Domieszki plastyfikujące i upłynniające, wywierając działanie dyspergujące, smarne i zmniejszające napięcie powierzchniowe wody, powodują utrzymanie się w zaczynie cementowym początkowo znacznych ilości wolnej wody na skutek opóźnienia tworzenia się etryngitu i/lub zmniejszenie ilości wody utrzymywanej w otoczkach solwatacyjnych wokół ziaren cementu i drobnych dodatków (cząstek wielkości do 0,125 mm). Powstający z opóźnieniem etryngit wiąże znaczne ilości wody i konsystencja zaczynu stopniowo zwiększa się (zaczyn gęstnieje). Zanim to nastąpi, zwiększa się ciekłość oraz urabialność zaczynu cementowego [2].

Budowa chemiczna domieszek redukujących wodę pozwala zaliczyć je do polielektrolitów. W swym głównym działaniu, ich celem jest deflokulacja zaczynu cementowego. Zazwyczaj tworzone są jako syntetyczne, łańcuchowe lub sieciowe polimery lub kopolimery z grupami aktywnymi [4].

Budowa superplastyfikatorów różni się od plastyfikatorów wyższym stopniem polimerizacji cząstek, innym rozkładem grup funkcyjnych, co powoduje w efekcie w plastyfikatorach większy wpływ powierzchniowych części hydrofobowych.

Według Taylora jest to jedna z zasadniczych przyczyn głównej ilościowej różnicy w efektach działania pomiędzy plastyfikatorami a superplastyfikatorami.

Uboczne skutki napowietrzające lignosulfonianów ograniczają praktyczne ilości ich dozowania do około 0,3%, co daje redukcję wody w mieszance na poziomie 8÷12%.

Jeśli użyć superplastyfikatorów w zbliżonej ilości względem masy cementu, wówczas taki sam efekt upłynnienia ujawni podobny poziom redukcji wody, co wydaje się potwierdzać tożsamość mechanizmów działania obu grup. Wyższa efektywność superplastyfikatorów powodowana będzie też przez polimolekularność odkładu na cząsteczkach cementu i współtowarzyszący temu „efekt smarny”.

Szczególnie efektywne superplastyfikatory, tzw. trzeciej generacji, różnią się natomiast w sposób zasadniczy od poprzednich dominującym kierunkiem działania. Wynika on po stronie budowy chemiczno-strukturalnej z mniejszej ilości grup funkcyjnych oraz bardzo rozbudowanej sieci łańcuchów bocznych [4].

W rezultacie tego ich mechanizm deflokulacji, dzięki długim łańcuchom w przeciwieństwie do plastyfikatorów i superplastyfikatorów deflokulujących elektrostatycznie, tworzy przede wszystkim fizyczne bariery separacji hydrolizujących cząstek cementu, określone mianem tzw. efektu sferycznego.

Przebiegające kontynualnie procesy przemian hydratacyjnych, dzięki tak skutecznym barierom dla sił przyciągania Van der Waalsa, mogą dopiero po około 100, 120 minutach rozpocząć w sposób znaczący proces gęstnienia i zmiany stopnia upłynnienia.

W przeciwieństwie do superplastyfikatorów, nie tylko ilościowy efekt upłynnienia, ale również i czas trwania stabilnej konsystencji, niekiedy nawet trzykrotnie dłuższy, daje zdecydowaną przewagę superplastyfikatorom trzeciej generacji.

4. BADANIA LABORATORYJNE

Celem badań laboratoryjnych było określenie wpływu :

- plastyfikatora Klutan P (lignosulfonian wapniowo-potasowy),
- superplastyfikatora Arpoment P (żywica melaminowo-naftalenowa) – firmy war-Remedium,
- na właściwości reologiczne zaczynów uszczelniających sporządzanych na osnowie cementu portlandzkiego CEM I 32,5 R oraz wody wodociągowej.

Badania laboratoryjne związane z określaniem parametrów technologicznych świeżych zaczynów uszczelniających obejmowały pomiar:

- gęstości (masy) – za pomocą wagi ramiennej typu Baroid,
- rozlewności – za pomocą stożka ściętego (AzNII),
- lepkości umownej (względna) – za pomocą kubka Forda nr 4,
- filtracji – za pomocą prasy filtracyjnej typu Baroid,
- właściwości reologicznych – za pomocą lepkościomierza obrotowego o współosiowych cylindrach typu: Chan 35 API Viscometer o dwunastu prędkościach obrotowych.

Pomiaru właściwości reologicznych zaczynów uszczelniających dokonano za pomocą lepkościomierza obrotowego współosiowo-cylindrycznego typu Chan 35 API Viscometer o 12 prędkościach obrotowych (600, 300, 200, 100, 60, 30, 20, 10, 6, 3, 2, 1 obr./min, co odpowiada następującym szybkościom ścinania: 1022,04; 511,02; 340,7; 170,4; 102,2; 51,1; 34,08; 17,04; 10,22; 5,11; 3,41; 1,70 s⁻¹) [6, 8].

Plastyfikator Klutan P oraz superplastyfikator Arpoment P były dodawane do zaczynu w koncentracjach 0,5% ; 1,0% ; 1,5%; 2,0%; i 2,5% wagowo (w stosunku do masy suchego cementu).

Współczynnik wodno-cementowy (w/c) dla zaczynów wynosił: 0,35; 0,40; 0,45; 0,50 (tab. 1).

Tabela 1
Receptury zaczynów uszczelniających

Lp.	Symbol próbki	Współczynnik wodno-cementowy w/c [-]	Koncentracja plastyfikatora (superplastyfikatora) [%]	Nazwa plastyfikatora (superplastyfikatora)
1	1Z	0,35	bez dodatku	–
2	2Z	0,4	bez dodatku	–
3	3Z	0,45	bez dodatku	–
4	4Z	0,5	bez dodatku	–
5	1A1	0,35	0,5	Arpoment P
6	1A2	0,35	1,0	Arpoment P
7	1A3	0,35	1,5	Arpoment P
8	1A4	0,35	2,0	Arpoment P
9	1A5	0,35	2,5	Arpoment P
10	2A1	0,4	0,5	Arpoment P
11	2A2	0,4	1,0	Arpoment P
12	2A3	0,4	1,5	Arpoment P
13	2A4	0,4	2,0	Arpoment P
14	2A5	0,4	2,5	Arpoment P
15	3A1	0,45	0,5	Arpoment P
16	3A2	0,45	1,0	Arpoment P
17	3A3	0,45	1,5	Arpoment P
18	3A4	0,45	2,0	Arpoment P
19	3A5	0,45	2,5	Arpoment P
20	4A1	0,5	0,5	Arpoment P
21	4A2	0,5	1,0	Arpoment P
22	4A3	0,5	1,5	Arpoment P
23	4A4	0,5	2,0	Arpoment P

Tabela 1 cd.

24	4A5	0,5	2,5	Arpoment P
25	1K1	0,35	0,5	Klutan P
26	1K2	0,35	1,0	Klutan P
27	1K3	0,35	1,5	Klutan P
28	1K4	0,35	2,0	Klutan P
29	1K5	0,35	2,5	Klutan P
30	2K1	0,4	0,5	Klutan P
31	2K2	0,4	1,0	Klutan P
32	2K3	0,4	1,5	Klutan P
33	2K4	0,4	2,0	Klutan P
34	2K5	0,4	2,5	Klutan P
35	3K1	0,45	0,5	Klutan P
36	3K2	0,45	1,0	Klutan P
37	3K3	0,45	1,5	Klutan P
38	3K4	0,45	2,0	Klutan P
39	3K5	0,45	2,5	Klutan P
40	4K1	0,5	0,5	Klutan P
41	4K2	0,5	1,0	Klutan P
42	4K3	0,5	1,5	Klutan P
43	4K4	0,5	2,0	Klutan P
44	4K5	0,5	2,5	Klutan P

Temperatura zaczynów uszczelniających przeznaczona do badania parametrów reologicznych wynosiła 20°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) [293 K].

Dobór optymalnego modelu reologicznego zaczynów uszczelniających polegał na określeniu krzywej reologicznej umożliwiającej najlepsze opisanie wyników pomiarów w układzie współrzędnych: naprężenia styczne (τ) – szybkość ścinania ($\dot{\gamma}$).

Wykorzystując metodę analizy regresji, wyznaczono parametry reologiczne dla poszczególnych modeli. Następnie za pomocą przeprowadzonych testów statystycznych określono optymalny model reologiczny dla danej receptury zaczynu uszczelniającego. Analizie poddano następujące modele reologiczne [3, 9, 10, 11, 12, 13, 14]:

- model Newtona

$$\tau = \eta \left(-\frac{dv}{dr} \right),$$

- model Bingham

$$\tau = \tau_y + \eta \left(-\frac{dv}{dr} \right),$$

- model Ostwalda de Waele

$$\tau = k \left(-\frac{dv}{dr} \right)^n,$$

- model Cassona

$$\tau = \sqrt{\tau_y} + \sqrt{\eta} \cdot \sqrt{\left(-\frac{dv}{dr} \right)},$$

- model Herschela–Bulkleya

$$\tau = \tau_y + k \left(-\frac{dv}{dr} \right)^n,$$

gdzie:

n – wykładnik potęgowy [–],

k – współczynnik konsystencji [$\text{Pa}\cdot\text{s}^n$],

τ_y – granica płynięcia [Pa],

η – dynamiczny współczynnik lepkości dla modelu Newtona, lepkość plastyczna dla modelu Bingham, lepkość plastyczna Cassona dla modelu Cassona [$\text{Pa}\cdot\text{s}$],

dv/dr – gradient prędkości ścinania [s^{-1}].

Celem ułatwienia obliczeń związanych z ustaleniem optymalnych modeli reologicznych dla badanych zaczynów, skorzystano z programu komputerowego Flow-Fluid Coef [9]. Program ten jest własnością Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH i jest wykorzystywany w pracach naukowo-badawczych.

5. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ LABORATORYJNYCH

W tabelach 2–8 zostały przedstawione obliczone parametry reologiczne zaczynów cementowych o różnych wartościach współczynnika wodno-cementowego (w/c [0,35÷0,50]) oraz różnych koncentracjach plastyfikatora Klutanu P i Arpomentu P. W tabeli 9 zamieszczono wyniki pozostałych parametrów technologicznych świeżych zaczynów uszczelniających.

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników badań parametrów technologicznych zaczynów uszczelniających, można stwierdzić zmniejszanie się zarówno lepkości pozornej, plastycznej, jak i granicy płynięcia wraz ze wzrostem współczynnika wodno-cementowego.

Tabela 2

Parametry reologiczne określone dla różnych modeli reologicznych zaczynów cementowych w temperaturze 20 ($\pm 2^\circ\text{C}$)

Parametry reologiczne		Oznaczenie zaczynu uszczelniającego			
		1Z	2Z	3Z	4Z
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa·s]	0,5593	0,3354	0,1292	0,0774
	Współczynnik korelacji [-]	0,7607	0,8974	0,8796	0,8862
	Lepkość pozorna przy 600 obr./min [Pa·s]	nm	nm	0,1110	0,0690
Model Bingham	Lepkość plastyczna [Pa·s]	0,4159	0,2726	0,1053	0,0630
	Granica płynięcia [Pa]	31,1258	21,1700	15,4425	9,3452
	Współczynnik korelacji [-]	0,9441	0,9777	0,9691	0,9789
	Lepkość pozorna przy 600 obr./min [Pa·s]	nm	nm	0,1110	0,0690
Model Ostwalda de Waele	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	10,7934	6,8816	3,5781	2,6287
	Wykładnik potęgowy [-]	0,4617	0,4800	0,4958	0,4559
	Współczynnik korelacji [-]	0,9972	0,9949	0,9980	0,9884
Model Cassona	Lepkość Cassona [Pa·s]	0,2681	0,1810	0,0732	0,0406
	Granica płynięcia [Pa]	14,8214	9,7254	6,8616	4,6390
	Współczynnik korelacji [-]	0,9703	0,9914	0,9855	0,9922
Model Herschela–Bulkleya	Granica płynięcia [Pa]	26,400	15,3213	8,1176	3,5477
	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	1,0148	1,0057	1,0043	0,9993
	Wykładnik potęgowy [-]	0,8506	0,7925	0,6756	0,6008
	Współczynnik korelacji [-]	0,9642	0,9922	0,9951	0,9951

nm – niemierzalne ze względu na dużą lepkość zaczynu

Superplastyfikator Arpoment P powoduje znaczny spadek zarówno lepkości pozornej, jak i lepkości plastycznej (tab. 3–5). Przy zbyt małej dawce ww. superplastyfikatora następuje niezadowalające polepszenie parametrów reologicznych zaczynu. Po zastosowaniu Arpomentu P w badanych zaczynach uszczelniających zaobserwowano znaczny spadek granicy płynięcia nawet przy najniższej koncentracji tego plastyfikatora w zaczynie.

Zastosowanie plastyfikatora Klutan P powoduje spadek (tab. 6–8) wszystkich trzech parametrów reologicznych (lepkości pozornej, lepkości plastycznej i granicy płynięcia). Zauważalne jest również, że jego działanie upłynniające jest słabsze w porównaniu z Arpomentem P, co widać przede wszystkim w przypadku zaczynów o niskich współczynnikach w/c .

Tabela 3

Parametry reologiczne określone dla różnych modeli reologicznych zaczynów cementowych w temperaturze 20 (±2°C)

Oznaczenie zaczynu uszczelniającego		1A1	1A2	1A3	1A4	1A5
		Parametry reologiczne				
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa·s]	0,3289	0,1051	0,841	0,1011	0,1161
	Współczynnik korelacji [-]	0,7261	0,9683	0,9916	0,9941	0,9988
	Lepkość pozorna przy 600 obr./min [Pa·s]	nm	0,1000	0,0805	0,0960	0,1135
Model Bingham	Lepkość plastyczna [Pa·s]	0,2402	0,0927	0,0789	0,0980	0,1139
	Granica płynięcia [Pa]	29,9593	8,0250	3,3441	1,9891	1,4229
	Współczynnik korelacji [-]	0,9426	0,9995	0,999	0,9957	0,9994
	Lepkość pozorna przy 600 obr./min [Pa·s]	nm	0,1000	0,0805	0,0960	0,1135
Model Ostwalda de Waele	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	9,4043	3,6789	1,2268	0,5923	0,4966
	Wykładnik potęgowy [-]	0,4401	0,4080	0,5435	0,6927	0,7418
	Współczynnik korelacji [-]	0,9947	0,8940	0,9202	0,9507	0,9563
Model Cassona	Lepkość Cassona [Pa·s]	0,1462	0,0576	0,0604	0,0862	0,1033
	Granica płynięcia [Pa]	15,5089	4,3958	1,2483	0,4026	0,2429
	Współczynnik korelacji [-]	0,9693	0,9960	0,9992	0,9966	0,9995
Model Herschela-Bulkleya	Granica płynięcia [Pa]	23,7862	1,8750	-2,4915	-4,3879	-5,1950
	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	1,0116	0,9917	0,9915	0,9928	0,9923
	Wykładnik potęgowy [-]	0,7734	0,6535	0,6304	0,6622	0,6835
	Współczynnik korelacji [-]	0,9694	0,9872	0,9875	0,9888	0,9896

nm – niemierzalne ze względu na dużą lepkość zaczynu

Na podstawie obliczonych współczynników korelacji dla poszczególnych modeli reologicznych zebranych w tabelach 2–8 stwierdzono, że:

- zaczyny uszczelniające bez domieszek (1Z–4Z) najlepiej opisuje model Ostwalda de Waele;
- zaczyny uszczelniające (od 1A1 – 4A5) z domieszką Arpoment P najlepiej opisuje model Bingham;

- zaczyny uszczelniające (1K1 – 4K5) z domieszką Klutan P pod względem reologicznym opisywane są modelem Bingham i Cassona, występuje także model Ostwalda de Waele i Herschela–Bulkleya (w zależności od współczynnika w/c oraz koncentracji plastyfikatora).

Tabela 4

Parametry reologiczne określone dla różnych modeli reologicznych zaczynów cementowych w temperaturze 20 ($\pm 2^\circ\text{C}$)

Oznaczenie zaczynu uszczelniającego		2A1	2A2	2A3	2A4	2A5
		Parametry reologiczne				
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa·s]	0,1216	0,0789	0,0639	0,0592	0,0578
	Współczynnik korelacji [-]	0,8031	0,9841	0,9951	0,9982	0,9951
	Lepkość pozorna przy 600 obr./min [Pa·s]	0,1060	0,0725	0,0620	0,0600	0,0600
Model Bingham	Lepkość plastyczna [Pa·s]	0,0927	0,0736	0,0608	0,5885	0,0568
	Granica płynięcia [Pa]	18,6220	3,3642	2,0011	0,4834	0,6249
	Współczynnik korelacji [-]	0,9814	0,9926	0,9995	0,9985	0,9956
	Lepkość pozorna przy 600 obr./min [Pa·s]	0,1060	0,0725	0,0620	0,0600	0,0600
Model Ostwalda de Waele	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	7,3538	1,0147	0,8085	0,2297	0,5991
	Wykładnik potęgowy [-]	0,3570	0,5662	0,5584	0,7625	0,5731
	Współczynnik korelacji [-]	0,9708	0,9338	0,9052	0,9603	0,8538
Model Cassona	Lepkość Cassona [Pa·s]	0,0501	0,0596	0,0477	0,0512	0,0435
	Granica płynięcia [Pa]	11,2906	1,0067	0,7137	0,1354	0,3991
	Współczynnik korelacji [-]	0,9955	0,9962	0,9988	0,9967	0,9873
Model Herschela–Bulkleya	Granica płynięcia [Pa]	11,9099	-2,5135	-3,1939	-4,4703	-4,1185
	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	1,0001	0,9939	0,9894	0,9870	0,9843
	Wykładnik potęgowy [-]	0,6561	0,6217	0,5921	0,5851	0,5797
	Współczynnik korelacji [-]	0,9955	0,9919	0,9804	0,9673	0,9528

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników rozlewności zaczynów uszczelniających (tab. 9) można stwierdzić wprost proporcjonalny wzrost rozlewności do wzrostu współczynnika wodno-cementowego.

Tabela 5

Parametry reologiczne określone dla różnych modeli reologicznych zaczynów cementowych w temperaturze 20 ($\pm 2^\circ\text{C}$)

Oznaczenie zaczynu uszczelniającego		3A1	3A2	3A3	3A4	3A5
		Parametry reologiczne				
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa·s]	0,0393	0,0449	0,0553	0,0410	0,0383
	Współczynnik korelacji [-]	0,9930	0,9942	0,9964	0,9901	0,9928
	Lepkość pozorna przy 600 obr./min [Pa·s]	0,0415	0,0465	0,0575	0,0440	0,0405
Model Bingham	Lepkość plastyczna [Pa·s]	0,0392	0,0448	0,0556	0,0416	0,0385
	Granica płynięcia [Pa]	0,0850	0,0879	-0,2018	-0,3747	-0,1289
	Współczynnik korelacji [-]	0,9930	0,9842	0,9965	0,9904	0,9928
	Lepkość pozorna przy 600 obr./min [Pa·s]	0,0415	0,0465	0,0575	0,0440	0,0405
Model Ostwalda de Waele	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	0,3238	0,2942	0,2868	0,9839	0,2493
	Wykładnik potęgowy [-]	0,6077	0,6430	0,6826	0,5763	0,6438
	Współczynnik korelacji [-]	0,8521	0,8638	0,8780	0,9904	0,8568
Model Cassona	Lepkość Cassona [Pa·s]	0,0303	0,0369	0,0466	0,0333	0,0306
	Granica płynięcia [Pa]	0,1852	0,1250	0,0928	0,0767	0,1108
	Współczynnik korelacji [-]	0,9828	0,9886	0,9906	0,9797	0,9832
Model Herschela–Bulkleya	Granica płynięcia [Pa]	-3,8894	-4,2354	-4,8905	-4,3969	-4,0647
	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	0,9816	0,9838	0,9839	0,9806	0,9813
	Wykładnik potęgowy [-]	0,5244	0,5453	0,5763	0,5325	0,5218
	Współczynnik korelacji [-]	0,9324	0,9479	0,9523	0,9263	0,9304

Wpływ badanych domieszek na rozlewność zaczynów uszczelniających był bardzo wyraźny.

Dodawanie do zaczynu uszczelniającego Arpomentu P, Klutanu P powoduje znaczny wzrost rozlewności zaczynu tym większy jest wpływ tych domieszek, im wyższy jest współczynnik wodno-cementowy.

Tabela 6

Parametry reologiczne określone dla różnych modeli reologicznych zaczynów cementowych w temperaturze 20 (±2°C)

Oznaczenie zaczynu uszczelniającego		1K1	1K2	1K3	1K4	1K5
		Parametry reologiczne				
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa·s]	1,6518	1,4856	0,5462	0,2836	0,1763
	Współczynnik korelacji [-]	0,8621	0,7467	0,7189	0,8085	0,9870
	Lepkość pozorna przy 600 obr./min [Pa·s]	nm	nm	nm	nm	nm
Model Bingham	Lepkość plastyczna [Pa·s]	1,2930	1,0646	0,3990	0,2140	0,1615
	Granica płynięcia [Pa]	23,3828	27,4385	31,9615	23,4983	5,0190
	Współczynnik korelacji [-]	0,9512	0,9353	0,9295	0,9770	0,9997
	Lepkość pozorna przy 600 obr./min [Pa·s]	nm	nm	nm	nm	nm
Model Ostwalda de Waele	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	9,9421	11,8130	9,9985	9,1028	2,2757
	Wykładnik potęgowy [-]	0,5820	0,5239	0,4804	0,4050	0,5257
	Współczynnik korelacji [-]	0,9847	0,9846	0,9913	0,9882	0,9361
Model Cassona	Lepkość Cassona [Pa·s]	0,9348	0,7008	0,2635	0,1199	0,1145
	Granica płynięcia [Pa]	8,2557	11,7045	14,8108	13,3221	2,1687
	Współczynnik korelacji [-]	0,9665	0,9590	0,9581	0,9916	0,9980
Model Herschela-Bulkleya	Granica płynięcia [Pa]	1,0168	27,6831	27,0795	17,8688	0,1481
	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	1,0500	1,0197	1,0170	1,0039	0,9943
	Wykładnik potęgowy [-]	24,9394	1,0089	0,8438	0,7539	0,7073
	Współczynnik korelacji [-]	0,9455	0,9341	0,9530	0,9904	0,9929

nm – niemierzalne ze względu na dużą lepkość zaczynu

Największy wzrost rozlewności spośród przebadanych domieszek zarejestrowano dla superplastyfikatora Arpoment P, dla którego wyniki pomiarów rozlewności są niemierzalne (tzn. są powyżej 260 mm) już dla zaczynu o $w/c = 0,40$ i 1,5% koncentracji w zaczynie.

Wpływ Klutanu P na rozlewność zaczynów uszczelniających nie jest jednakowy dla wszystkich przebadanych zaczynów. Podczas dodawania Klutanu P do zaczynów uszczelniających o niskim współczynniku w/c (0,35 i 0,4) początkowo następuje spadek rozlewności.

Tabela 7

Parametry reologiczne określone dla różnych modeli reologicznych zaczynów cementowych w temperaturze 20 (±2°C)

Oznaczenie zaczynu uszczelniającego		2K1	2K2	2K3	2K4	2K5
		Parametry reologiczne				
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa·s]	0,4593	0,2874	0,1741	0,1286	0,1167
	Współczynnik korelacji [-]	0,8757	0,8720	0,8860	0,9538	0,9995
	Lepkość pozorna przy 600 obr./min [Pa·s]	nm	nm	0,1490	0,1180	0,1175
Model Binghama	Lepkość plastyczna [Pa·s]	0,3715	0,2294	0,1424	0,1116	0,1155
	Granica płynięcia [Pa]	19,0591	19,5600	20,4688	10,9666	0,8246
	Współczynnik korelacji [-]	0,9581	0,9689	0,9720	0,9939	0,9997
	Lepkość pozorna przy 600 obr./min [Pa·s]	nm	nm	0,1490	0,1180	0,1175
Model Ostwalda de Waele	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	4,7109	5,3106	5,4208	3,6146	0,4951
	Wykładnik potęgowy [-]	0,5874	0,5155	0,4696	0,4638	0,7392
	Współczynnik korelacji [-]	0,9934	0,9982	0,9958	0,9592	0,9452
Model Cassona	Lepkość Cassona [Pa·s]	0,2831	0,1555	0,0971	0,0752	0,1022
	Granica płynięcia [Pa]	6,6852	8,6629	9,4086	5,1713	0,2241
	Współczynnik korelacji [-]	0,9730	0,9846	0,9887	0,9996	0,9984
Model Herschela–Bulkleya	Granica płynięcia [Pa]	14,3223	13,6926	12,3888	4,0428	-5,6590
	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	1,0116	1,0070	1,0051	0,9971	0,9904
	Wykładnik potęgowy [-]	0,8316	0,7655	0,7189	0,6819	0,6848
	Współczynnik korelacji [-]	0,9771	0,9882	0,9951	0,9979	0,9835

nm – niemierzalne ze względu na dużą lepkość zaczynu

Wzrost rozlewności dla współczynnika $w/c = 0,35$ zarejestrowano dopiero dla stosowanej maksymalnej dawki domieszki (2,5%), natomiast dla $w/c = 0,4$ wzrost rozlewności nastąpił dla 2% udziału Klutanu P w zaczynie.

Wyniki pomiarów lepkości względnej wg kubka Forda nr 4 świadczą o spadku jej wartości wraz ze wzrostem współczynnika wodno-cementowego (tab. 3), np. dla $w/c = 3,5$ lepkość jest niemierzalna ze względu na bardzo duże parametry reologiczne.

Tabela 8

Parametry reologiczne określone dla różnych modeli reologicznych zaczynów cementowych w temperaturze 20 (±2°C)

Oznaczenie zaczynu uszczelniającego		3K1	3K2	3K3	3K4	3K5
		Parametry reologiczne				
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa·s]	0,1266	0,0974	0,0802	0,0540	0,0525
	Współczynnik korelacji [-]	0,8902	0,8610	0,9724	0,9958	0,9977
	Lepkość pozorna przy 600 obr./min [Pa·s]	0,1115	0,0850	0,0765	0,0550	0,0540
Model Bingham	Lepkość plastyczna [Pa·s]	0,1035	0,0774	0,0715	0,0524	0,0524
	Granica płynięcia [Pa]	14,9247	12,8650	5,6402	1,0450	0,0505
	Współczynnik korelacji [-]	0,9773	0,9787	0,9981	0,9974	0,9977
	Lepkość pozorna przy 600 obr./min [Pa·s]	0,1115	0,0850	0,0765	0,0550	0,0540
Model Ostwalda de Waele	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	4,0778	4,1556	2,1533	0,5110	0,2257
	Wykładnik potęgowy [-]	0,4639	0,4163	0,4589	0,6058	0,7268
	Współczynnik korelacji [-]	0,9918	0,9856	0,9262	0,9062	0,9197
Model Cassona	Lepkość Cassona [Pa·s]	0,0686	0,0474	0,04756	0,0412	0,0493
	Granica płynięcia [Pa]	7,1385	6,8690	2,7834	0,4284	0,0165
	Współczynnik korelacji [-]	0,9916	0,9941	0,9977	0,9931	0,9969
Model Herschela–Bulkleya	Granica płynięcia [Pa]	7,8137	6,5174	0,0202	3,6550	-4,6455
	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	1,0021	1,0005	0,9917	0,9862	0,9861
	Wykładnik potęgowy [-]	0,6725	0,6308	0,6161	0,5687	0,5689
	Współczynnik korelacji [-]	0,9964	0,9974	0,9857	0,9615	0,9612

Dodatek Arpomentu P powoduje generalnie spadek lepkości względnej bez względu na jego koncentrację w stosunku do zaczynu bez domieszki. Nie jest to spadek wprost proporcjonalny do koncentracji Arpomentu P.

Dla zaczynów o wysokim $w/c = 0,5$ spadek lepkości jest niemalże stały bez względu na ilość wprowadzonego do zaczynu Arpomentu P.

Plastyfikator Klutan P obniża lepkość względną proporcjonalnie do swojej koncentracji w zaczynie uszczelniającym. Tendencja ta jest zachowana we wszystkich przebadanych zaczynach.

Tabela 9

Parametry technologiczne zaczynów uszczelniających określone laboratoryjnie
w temperaturze 20 ($\pm 2^{\circ}\text{C}$)

Lp.	Oznaczenie zaczynu uszczelniającego	Współczynnik wodno- -cementowy w/c	Gęstość	Rozlewność wg stożka Az N II	Lepkość względna wg kubka Forda nr 4	Filtracja właściwa $\Delta P = 0,7 \text{ MPa}$
	[-]	[-]	[kg/m ³]	[mm]	[s]	[cm ³ /s]
1	1Z	0,35	2020	110	nm	30/7
2	2Z	0,4	1950	140	nm	44/10
3	3Z	0,45	1870	180	nm	75/22
4	4Z	0,5	1820	230	24	86/20
5	1A1	0,35	2150	135	nm	38/29
6	1A2	0,35	2000	225	nm	37/120
7	1A3	0,35	1990	230	26	32/466
8	1A4	0,35	1960	>260	25	22/np
9	1A5	0,35	2010	>260	27	16/np
10	2A1	0,4	1940	>260	nm	44/24
11	2A2	0,4	1950	250	19	41/288
12	2A3	0,4	1930	>260	16	33/16
13	2A4	0,4	1930	>260	15	26/np
14	2A5	0,4	1860	>260	14	7/np
15	3A1	0,45	1840	>260	12	58/57
16	3A2	0,45	1820	>260	14	50/953
17	3A3	0,45	1840	>260	16	27/np
18	3A4	0,45	1770	>260	12	15/np
19	3A5	0,45	1730	>260	14	9/np
20	4A1	0,5	1820	>260	13	74/65
21	4A2	0,5	1800	>260	12	58/933
22	4A3	0,5	1760	>260	12	29/np
23	4A4	0,5	1810	>260	12	18/np
24	4A5	0,5	1690	>260	11	12/np
25	1K1	0,35	2020	90<	nm	40/14

Tabela 9 cd.

26	1K2	0,35	1930	90 <	nm	53/20
27	1K3	0,35	1980	90 <	nm	52/20
28	1K4	0,35	1970	90 <	nm	49/24
29	1K5	0,35	1970	170	75	46/28
30	2K1	0,4	1950	130	nm	52/17
31	2K2	0,4	1940	130	nm	61/19
32	2K3	0,4	0930	140	nm	57/20
33	2K4	0,4	1920	180	50	56/26
34	2K5	0,4	1910	> 260	40	55/32
35	3K1	0,45	1870	210	nm	65/16
36	3K2	0,45	1870	> 260	nm	67/17
37	3K3	0,45	1870	> 260	21	69/19
38	3K4	0,45	1850	> 260	16	56/23
39	3K5	0,45	1810	> 260	14	45/28
40	4K1	0,5	1830	220	nm	75/18
41	4K2	0,5	1830	> 260	nm	80/19
42	4K3	0,5	1830	> 260	18	72/20
43	4K4	0,5	1800	> 260	13	70/24
44	4K5	0,5	1750	> 260	11	69/27

nm – niemierzalne ze względu na dużą lepkość zaczynu

np – nie określono czasu trwania filtracji

LITERATURA

- [1] *Hole-Cleaning Model: What Does the Fluid Flow Index Have To Do with It?* Journal of Petroleum Technology, Nov. 1996
- [2] Jasiczak J., Mikołajczak P.: *Technologia betonu modyfikowanego domieszkami i dodatkami*. <http://www.ikb.poznan.pl/almamater/biblioteka>
- [3] Klotz J.A., Brigham W.E.: *To determine Herschel–Bulkley coefficients*. Journal of Petroleum Technology, Nov. 1998
- [4] Mierzwa J.: *Domieszki stosowane przy wytwarzaniu betonu I ich wpływ na jego właściwości w konstrukcjach*. XVII Ogólnopolska Konferencja „Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji”, Ustroń 2002

- [5] Pinka J., Wittenberger G., Engel J.: *Dobycie łożysk wiertniczych*. Kosice, AMS F BERG, TU v Kosiciach 2006
- [6] Raczkowski J.: *Technologia płuczek wiertniczych*. Katowice, Wyd. Śląsk 1981
- [7] Stryczek S., Gonet A.: *Geoinżynieria*. Studia, Rozprawy, Monografie, Nr 71, Kraków, PAN Wydawnictwo Sigmie 2000
- [8] Stryczek S.: *Wyznaczanie parametrów reologicznych płuczek wiertniczych*. Nowoczesne Techniki i Technologie Bezwykopowe, 2, 1999
- [9] Stoch M.: *Wpływ różnych plastyfikatorów na zmianę właściwości reologicznych zaczynów uszczelniających*. Kraków, AGH WWiNiG 2003
- [10] Wiśniowski R.: *Zastosowanie modelu Herschela–Bulkleya w hydraulice płuczek wiertniczych*. Nowoczesne Techniki i Technologie Bezwykopowe, 2, 2000
- [11] Wiśniowski R.: *Metodyka określania modeli reologicznych cieczy wiertniczej*. Rocznik AGH Wiertnictwo Nafta Gaz, 18/1, 2001
- [12] Wiśniowski R., Skrzypaszek K.: *Komputerowe wspomaganie wyznaczania modelu reologicznego cieczy – program Flow Fluid Coef*. Nowoczesne Techniki i Technologie Bezwykopowe, 2–3, 2001
- [13] Wiśniowski R., Stryczek S., Skrzypaszek K.: *Wyznaczanie oporów laminarnego przepływu zaczynów cementowych, opisywanych modelem Herschela–Bulkleya*. Rocznik AGH Wiertnictwo Nafta Gaz, 23/1, 2006
- [14] Wiśniowski R., Skrzypaszek K.: *Analiza modeli reologicznych stosowanych w technologiach inżynierskich*. Rocznik AGH Wiertnictwo Nafta Gaz, 23/1, 2006
- [15] Wiśniowski R.: *O oporach przepływu cieczy wiertniczych*. Rocznik AGH Wiertnictwo Nafta Gaz, 20/2, 2003