

**Stanisław Stryczek*, Rafał Wiśniowski*,
Andrzej Gonet*, Wojciech Ferens***

**PARAMETRY REOLOGICZNE
ŚWIEŻYCH ZACZYNÓW USZCZELNIAJĄCYCH
W ZALEŻNOŚCI OD CZASU ICH SPORZĄDZENIA****

1. WSTĘP

Jednym z najbardziej istotnych czynników wpływających na skuteczność uszczelniania i wzmacniania ośrodka gruntowego i masywu skalnego metodami geoinżynierskimi jest dobór rodzaju zaczynu uszczelniającego o odpowiednich parametrach technologicznych do istniejących warunków geologicznych, geotechnicznych i hydrogeologicznych.

Celem zapewnienia wysokiej skuteczności wykonywanych prac należy stosować zaczyny uszczelniające, które muszą spełniać 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:

- racjonalny dobór technologii uszczelniania górotworu,
- określenie strat ciśnień w układzie cyrkulacyjnym,
- ocenę rozkładu gradientu ciśnienia hydrostatycznego zaczynu uszczelniającego przy jego wtlaczaniu w górotwór,
- określenie prędkości sedymentacji zaczynu (jeżeli występuje),
- projektowanie strumienia objętości tłoczenia zaczynu uszczelniającego zapewniającego właściwe warunki przepływu w górotworze,
- określenie promienia zasięgu rozchodzenia się zaczynu w górotworze w przypadku stosowania otworowej iniekcji ciśnieniowej.

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

** Praca została wykonana w ramach badań statutowych nr. 11.11.190.01 na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie

Trzecim wymogiem jest potrzeba zapewnienia odpowiedniej wytrzymałości oraz trwałości stwardniałych zaczynów uszczelniających, powstałych na skutek procesów fizykochemicznych. Receptury zaczynów powinny być tak dobrane, by utworzone ciało stałe miało właściwości mechaniczne takie same lub porównywalne z właściwościami naturalnego górotworu. Zapewniając stabilność i konsolidację zarówno ośrodka gruntowego, jak i masywu skalnego, eliminuje się przyczyny występowania dodatkowych przemieszczeń i deformacji w górotworze.

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).

2. WPLYW FIZYKOCHEMICZNYCH CZYNNIKÓW NA ZMIANY WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNYCH ZACZYNÓW USZCZELNIAJĄCYCH SPORZĄDZANYCH NA OSNOWIE CEMENTU

Badania właściwości reologicznych świeżych zaczynów uszczelniających, a zwłaszcza typu cementowego wykazały, że zależą one od wielu czynników, do których należą:

- powierzchnia właściwa oraz granulacja spoiw hydraulicznych wchodzących w skład zaczynu uszczelniającego,
- iloraz wody i spoiwa hydraulicznego (współczynnik w/s),
- skład chemiczny spoiwa hydraulicznego (np. cementu),
- skład chemiczny cieczy zarobowej,
- obecność i skład chemiczny dodatków oraz domieszek wchodzących w skład receptury zaczynu,
- sposób oraz dynamika mieszania zaczynu,
- temperatura zaczynu,
- szybkość hydratacji,
- warunki oraz metodyka sposób pomiaru.

Zaczyn cementowy po zarobieniu wodą jest zawiesiną cząstek cementowych w wodzie. Początkowo zawiesina cementowa jest układem trójfazowym (woda, cząstki klinkieru i powietrze), lecz w wyniku hydratacji składników cementu przechodzi w skład wielofazowy, ulegający dalszym przemianom w czasie. Hipoteza Taylora dotycząca wiązania i stwardnienia zaczynu cementu portlandzkiego podaje stadia tego procesu:

- rozproszenie niereagujących ziarn klinkieru cementowego w wodzie,
- tworzenie się produktów hydratacji, które zbierają się na powierzchni poszczególnych ziarn (po ok. 5 min),
- łączenie się pokrytych produktami hydratacji ziarn klinkieru przy jednoczesnym wypełnieniu przez żel przestrzeni między nimi (po ok. 5 h),
- dalsze zmiany zachodzące w żelu (po ok. 5 dniach).

Zaczyn cementowy jest skomplikowanym układem heterogenicznym, który zmienia swoje właściwości w czasie, zarówno pod wpływem czynników wewnętrznych, jak i zewnętrznych. Zaczyny cementowe po zarobieniu z wodą ogólnie można zaliczyć do złożonych cieczy nienuwtonowskich o własnościach reologicznych zmieniających się w czasie.

W początkowym okresie po zarobieniu cementu wodą zachodzi wzajemne oddziaływanie minerałów klinkieru z wodą, czemu towarzyszą dość szybkie reakcje chemiczne. Po tym następuje długi okres zwolnionej aktywności przebiegu reakcji, który w zależności od chemiczno-fizycznego składu cementu oraz temperatury trwa od 40 do 120 min. w tym okresie zaczyn cementowy jest plastyczny, ma pewną wytrzymałość i sztywność, choć cząstki cementu są oddzielone otoczkami solwatacyjnymi. Stała ilość wydzielonej wody z zaczynu przy sedymentacji wskazuje, że cząstki cementu pozostają oddzielone podczas całego tego okresu.

Ponieważ ziarna cementu są hydrofilne, na ich powierzchni tworzą się solwatacyjne otoczki skupiające elektrostatyczne ładunki o dodatnim potencjale ζ (zeta). Łączny efekt warstw solwatacyjnych i ładunków elektrostatycznych jest taki, że zapobiega kontaktom pomiędzy sąsiednimi warstwami. Z drugiej strony ziarna cementu w zaczynie cementowym są na tyle skoncentrowane, że powstają między nimi siły wzajemnego międzycząsteczkowego przyciągania. Ponieważ na ostrych krawędziach ziarn cementowych grubość otoczek solwatacyjnych jest zwykle mniejsza niż na pozostałych częściach powierzchni, gęstość ładunku jest tam również mniejsza, a co za tym idzie mniejsza jest siła odpychania. Powoduje to utworzenie koagulacyjnej struktury przypominającej strukturę siatkową. Pozostałymi czynnikami mającymi wpływ na kształtowanie się nowo powstającej struktury są: rozmiar, kształt, koncentracja cząstek i lepkość zawiesiny cementowej. W zaczynie cementowym dość sztywna konsystencja wynika głównie z faktu oddziaływań sił międzycząsteczkowych, a lepkość odgrywa drugorzędna rolę. Ziarna cementu w powstałej strukturze praktycznie nie stykają się bezpośrednio, lecz najbardziej blisko położone krawędzie ziarn rozdzielone są cienką warstwą wody.

Lepkość pozorna zaczynów cementowych zmienia się ze zmianą współczynnika wodno-cementowego, temperatury i czasu mieszania. Wraz ze wzrostem współczynnika wodno-cementowego lepkość zaczynu maleje. Zaczyny przechowywane zarówno w temperaturze pokojowej, jak i podwyższonej, wykazują wzrost lepkości pozornej przy zmniejszającym się współczynnikiem w/c. Dla przykładu można podać, że zmniejszenie współczynnika w/c z 0,5 na 0,45 prowadzi do dość znacznego wzrostu lepkości pozornej, która może wzrosnąć ponad dwukrotnie. Podobnie zmienia się lepkość plastyczna oraz granica płynięcia. Podwyższenie temperatury powoduje znaczny wzrost lepkości pozornej oraz granicy płynięcia.

Wpływ temperatury i ciśnienia na konsystencję (lepkość ekwiwalentną) zaczynu uszczelniającego bada się za pomocą konsystometru. Badania te pozwalają na określenie przetłaczalności zaczynu cementowego w warunkach otworopodobnych przy określonych wielkościach temperatury i ciśnienia i dobór odczynników chemicznych do opóźnienia czasu wiązania zaczynu.

3. BADANIA LABORATORYJNE

Przeprowadzone badania laboratoryjne miały na celu zbadanie wpływu czasu na parametry reologiczne świeżych zaczynów uszczelniających, sporządzonych na osnowie cementu portlandzkiego CEM I 42,5R. W przeprowadzanych badaniach zmiennymi były:

- 1) współczynnik wodno-cementowy,
- 2) czas pomiaru.

3.1. Metodyka badań laboratoryjnych

Badania laboratoryjne związane z pomiarem parametrów reologicznych świeżych zaczynów uszczelniających przeprowadzono według następujących norm:

1. API Recommended Practice for Testing Oil-Well Cements and Cement Additives. API RP 10 B. April 1997.
2. PN-EN ISO 10426-2. Przemysł naftowy i gazowniczy. Cementy i materiały do cementowania otworów. Część 2: Badania cementów wiertniczych. 2003.

3.2. Charakterystyka surowców służących do sporządzania zaczynów uszczelniających

Do badań laboratoryjnych wykorzystano cement portlandzki CEM I 42,5R z cementowni Górażdże Cement S.A.

3.3. Przygotowanie zaczynów uszczelniających do badań laboratoryjnych

Współczynnik wodno-cementowy (w/c) dla badanych zaczynów uszczelniających wynosił: 0,4; 0,5; 0,6; 0,7.

Czas, po którym wykonywane były pomiary parametrów reologicznych dla poszczególnych cementów, wynosił: chwilę po wymieszaniu; 30 min; 1 h; 1,5 h, 2 h, 3 h, 4 h, 5 h, 6 h.

Zaczyny sporządzano w temperaturze ok. 20°C (293 K). Cement przeznaczony do sporządzenia zaczynów (zgodnie z wymaganiami ISO 25911-1 i ISO 3310-1) był przesiewany przez trzy sита z drutu o wymiarach boku oczka kwadratowego: 1,0; 0,20; 0,08 mm. Do sporządzania zaczynów stosowano tylko przesiany cement.

Ciecz zarobową stanowiła woda wodociągowa.

3.4. Pomiary właściwości reologicznych zaczynów uszczelniających

Badania laboratoryjne związane z określeniem parametrów reologicznych świeżych zaczynów uszczelniających obejmują pomiary:

- rozlewności – za pomocą stożka AzNII,
- lepkości względnej – za pomocą kubka Forda nr 4,
- właściwości reologicznych – za pomocą lepkościomierza obrotowego o współosiowych cylindrach typu Chan – 35 API Viscometer – Tulusa, Oklahoma USA EG.G Chandler Engineering, o dwunastu prędkościach obrotowych (600, 300, 200, 100, 60, 30, 20, 10, 6, 3, 2, 1 obr./min, co odpowiada 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).

Wykorzystując metodę analizy regresji, wyznaczano 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:

- Newtona

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

- Binghama

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

- Ostwalda de Waele

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

- Cassona

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

- Herschela–Bulkleya

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

gdzie:

- n – wykładnik potęgowy [-],
- k – współczynnik konsystencji [Pa·sⁿ],
- τ_y – granica płynięcia, [Pa],
- η – dynamiczny współczynnik lepkości dla modelu Newtona, lepkość plastyczna dla modelu Binghama, lepkość plastyczna Cassona dla modelu Cassona [Pa·s],
- dv/dr – gradient prędkości ścinania $-\dot{\gamma}$ [s⁻¹].

W celu ułatwienia obliczeń związanych z ustaleniem optymalnych modeli reologicznych dla badanych zaczynów, skorzystano z programu komputerowego „Rheo Solution”. Program ten jest własnością Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH i jest wykorzystywany w pracach naukowo-badawczych.

4. WYNIKI Z BADAŃ LABORATORYJNYCH

W tabelach 1–4 zestawiono parametry reologiczne zaczynów uszczelniających uszeregowane wg poszczególnych modeli reologicznych oraz według czasu wykonania pomiaru od momentu zarobienia zaczynu. Spośród analizowanych modeli reologicznych wybierano tylko taki, którego współczynnik korelacji był najbardziej zbliżony do jedności (wyniki zaciemniono w tabelach na szaro).

Tabela 1 przedstawia parametry dla różnych modeli reologicznych zaczynu cementowego o współczynniku w/c = 0,4. Zaczyny badane były w odstępach czasu co pół godziny przez pierwsze dwie godziny od zarobienia, a następnie po kolejnej godzinie.

Jak wynika z tabeli 1 współczynnik konsystencji wykazuje gwałtowny wzrost między drugą a trzecią godziną od zarobienia zaczynu. Wtedy też spada wykładnik potęgowy dla współczynnika konsystencji prawie dwukrotnie. Obserwuje się także wyraźną zmianę wartości granicy płynięcia (dla modelu Cassona).

Modelem reologicznym optymalnie opisującym parametry reologiczne tego zaczynu jest model Herschela–Bulkleya. Posiada on najwyższe współczynniki korelacji ze wszystkich modeli.

Tabela 2 przedstawia parametry reologiczne zaczynu cementowego o współczynniku $w/c = 0,5$. Zaczyn badany był w odstępach czasu co pół godziny przez pierwsze dwie godziny od momentu zarobienia, a następnie co godzinę aż do piątej godziny od zarobienia.

Analizując dane zawarte w tabeli 2, można stwierdzić, że wyraźny wzrost współczynnika konsystencji oraz wartość granicy płynięcia następuje między czwartą a piątą godziną pomiaru. Pierwsze objawy wpływu czasu na wartości parametrów reologicznych obserwuje się już po drugiej godzinie od momentu zarobienia zaczynu (wzrost lepkości pozornej). Natomiast po godzinie piątej, lepkość pozorna osiąga wartość maksymalną, a zaczyn przestaje być przetłaczalny.

Modele reologiczne najdokładniej opisujące parametry reologiczne tego zaczynu to model Cassona oraz Herschela–Bulkleya. Posiadają one najwyższe współczynniki korelacji ze wszystkich przedstawionych modeli.

W tabeli 3 przedstawiono parametry reologiczne zaczynu uszczelniającego o współczynniku $w/c = 0,6$. Zaczyn badany był w odstępach czasu co pół godziny przez pierwsze dwie godziny, następnie po dwóch godzinach przerwy co godzinę aż do szóstej godziny od zarobienia.

Dane zawarte w tabeli 3 pozwalają na stwierdzenie, że parametry reologiczne tego rodzaju zaczynów mogą być opisywane zarówno modelem reologicznym Herschela–Bulkleya, jak i Cassona. Modele te posiadają bardzo zbliżone do siebie współczynniki korelacji. Lepkość plastyczna dla modelu Cassona wykazuje największy wzrost po czasie większym od dwóch godzin od momentu zarobienia zaczynu. Również po tym czasie obserwuje się gwałtowny wzrost lepkości pozornej i plastycznej oraz współczynnika konsystencji, przy równoczesnym spadku wartości wykładnika potęgowego .

Można stwierdzić, że zaczyn ten w temperaturze 20°C może być przetłaczalny nawet po 6 godzinach od momentu jego sporządzenia.

Tabela 4 przedstawia parametry reologiczne zaczynu cementowego o współczynniku $w/c = 0,7$. Zaczyn badany był w odstępach czasu co pół godziny przez pierwsze dwie godziny, następnie po dwóch godzinach przerwy co godzinę aż do szóstej godziny od zarobienia. Modele reologiczne najdokładniej opisujące parametry reologiczne tego zaczynu to model Cassona oraz Herschela–Bulkleya. Z analizy danych z tabeli 4 wynika, że zaczyn o współczynniku $w/c = 0,7$ jest przetłaczany nawet po 6 godzinach od momentu jego zarobienia. Gwałtowny wzrost parametrów reologicznych, takich jak: lepkość pozorna i plastyczna oraz współczynnik konsystencji następuje dopiero po 4 godzinie od momentu zarobienia. Wtedy też obserwuje się nagły spadek wykładnika potęgowego.

W tabeli 5 zamieszczono wyniki badań laboratoryjnych lepkości względnej mierzonej kubkiem Forda nr 4 oraz rozlewności określanej stożkiem AZNII, natomiast w tabelach 6 i 7 zestawiono parametry analiz statystycznych określających zależności:

- rozlewności od lepkości plastycznej oraz rozlewności od czasu pomiaru dla zaczynu cementowego o współczynnikach w/c : 0,4 i 0,5;
- czasu wypływu z kubka Forda nr 4 od lepkości plastycznej oraz czasu wypływu z kubka Forda nr4 od czasu pomiaru dla zaczynu cementowego o współczynnikach w/c : 0,6 i 0,7.

Tabela 1

Parametry reologiczne zaczynu cementowego sporządzonego na podstawie cementu portlandzkiego CEM I 42,5R o współczynniku $w/c = 0,4$, określone w temp. 20°C dla różnych modeli reologicznych

Czas wykonania pomiaru (od momentu zarobienia zaczynu), [h]		0	0,5	1	1,5	2	3
Parametry reologiczne	Model Newtona	0,1869	0,1654	0,1722	0,1826	0,1829	0,2028
	Model Bingham	0,8476	0,8301	0,8433	0,8213	0,7930	0,5598
	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa·s]	0,1514	0,1313	0,1371	0,1441	0,1413	0,1429
	Współczynnik korelacji [-]	22,8949	22,0237	22,7130	24,8696	26,8475	38,6350
	Lepkość plastyczna [Pa]	0,9401	0,9464	0,9578	0,9444	0,9448	0,8831
	Granica płynięcia [Pa]	4,4377	4,8164	5,3422	5,4397	6,5496	10,2621
	Współczynnik korelacji [-]	0,5258	0,4937	0,4810	0,4914	0,4613	0,4145
	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	0,9938	0,9971	0,9983	0,9964	0,9977	0,9831
	Wykładnik potęgowy [-]	0,1147	0,0935	0,0943	0,1021	0,0951	0,0919
	Współczynnik korelacji [-]	8,8352	9,5326	10,3291	10,8712	12,7207	19,8864
	Lepkość Cassona [Pa·s]	0,9602	0,9684	0,9780	0,9671	0,9698	0,9260
	Granica płynięcia [Pa]	-6,8466	-3,4030	0,5842	-4,3634	-2,7554	-26,3675
	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	8,1133	6,9396	5,3827	8,2388	8,5716	29,7994
	Wykładnik potęgowy [-]	0,4352	0,4364	0,4759	0,4259	0,4178	0,2658
	Współczynnik korelacji [-]	0,9972	0,9992	0,9987	0,9993	0,9994	0,9950
	Lepkość pozorna przy 1022,04 [s ⁻¹] [Pa·s]	0,1500	0,1350	0,1450	0,1490	0,1500	0,1500

Tabela 2

Parametry reologiczne zaczynu cementowego sporządzonego na podstawie cementu portlandzkiego CEM I 42,5R o współczynniku w/c = 0,5, określone w temp. 20°C dla różnych modeli reologicznych

Czas wykonania pomiaru (od momentu zarobienia zaczynu), [h]		0	0,5	1	1,5	2	3	4	5
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa·s]	0,0652	0,0751	0,0824	0,0859	0,0986	0,1223	0,1649	0,1921
	Współczynnik korelacji [-]	0,8875	0,8732	0,8676	0,8726	0,8605	0,8207	0,8684	0,7943
Model Binghama	Lepkość plastyczna [Pa·s]	0,0528	0,0603	0,0660	0,0691	0,0788	0,0957	0,1340	0,1504
	Granica płynięcia [Pa]	7,9906	9,5462	10,5543	10,8712	12,7768	17,1595	19,9786	26,9237
Model Ostwalda de Waele	Współczynnik korelacji [-]	0,9847	0,9794	0,9756	0,9774	0,9713	0,9560	0,9602	0,9249
	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	2,6115	2,9222	3,0656	3,2251	3,5163	4,4683	4,7633	5,8775
Model Cassona	Wykładnik potęgowy [-]	0,4229	0,4321	0,4420	0,4389	0,4517	0,4532	0,4867	0,4865
	Współczynnik korelacji [-]	0,9766	0,9866	0,9919	0,9898	0,9954	0,9993	0,9988	0,9922
Model Herschel-Bulkleya	Lepkość Cassona [Pa·s]	0,0322	0,0376	0,0421	0,0439	0,0512	0,0634	0,0947	0,1090
	Granica płynięcia [Pa]	4,2788	4,9635	5,3387	5,5301	6,3003	8,2826	8,6805	11,4378
Model Herschel-Bulkleya	Współczynnik korelacji [-]	0,9954	0,9937	0,9918	0,9927	0,9889	0,9787	0,9793	0,9509
	Granica płynięcia [Pa]	4,7758	4,5007	4,0094	4,4818	3,7249	1,0624	0,6246	-9,6838
Lepkość pozorna przy 1022,04 [s ⁻¹] [Pa·s]	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	0,4435	0,8116	1,1601	1,0872	1,7594	4,0193	4,3264	11,4858
	Wykładnik potęgowy [-]	0,6917	0,6247	0,5871	0,6026	0,5536	0,4669	0,5030	0,3889
Lepkość pozorna przy 1022,04 [s ⁻¹] [Pa·s]	Współczynnik korelacji [-]	0,9952	0,9966	0,9978	0,9974	0,9981	0,9993	0,9991	0,9959
	Lepkość pozorna przy 1022,04 [s ⁻¹] [Pa·s]	0,0585	0,0660	0,0715	0,0750	0,0850	0,1020	0,1375	0,1500

Tabela 3

Parametry reologiczne zaczynu cementowego sporządzonego na podstawie cementu portlandzkiego CEM I 42,5R o współczynniku w/c = 0,6, określone w temp. 20°C dla różnych modeli reologicznych

Czas wykonania pomiaru (od momentu zarobienia zaczynu), [h]		0	0,5	1	1,5	2	4	5	6
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa·s]	0,0322	0,0327	0,0330	0,0370	0,0344	0,0631	0,0856	0,1171
	Współczynnik korelacji [-]	0,9206	0,8990	0,8788	0,8871	0,8670	0,8689	0,8328	0,8413
	Lepkość plastyczna [Pa·s]	0,0267	0,0266	0,0263	0,0298	0,0272	0,0503	0,0671	0,0929
Model Binghama	Granica płynięcia [Pa]	3,5590	3,9618	4,3045	4,6719	4,6511	8,2954	11,9250	15,6584
	Współczynnik korelacji [-]	0,9961	0,9941	0,9943	0,9926	0,9941	0,9857	0,9672	0,9602
	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	1,5690	1,6874	1,9654	1,9810	2,1605	3,0404	3,6219	4,3171
Model Ostwalda de Waele	Wykładnik potęgowy [-]	0,3698	0,3677	0,3433	0,3635	0,3353	0,3903	0,4221	0,4460
	Współczynnik korelacji [-]	0,9235	0,9360	0,9291	0,9428	0,9301	0,9705	0,9948	0,9981
	Lepkość Cassona [Pa·s]	0,0153	0,0148	0,0141	0,0166	0,0143	0,0293	0,0422	0,0618
Model Cassona	Granica płynięcia [Pa]	2,0854	2,3741	2,6734	2,7872	2,9188	4,6971	6,1589	7,5195
	Współczynnik korelacji [-]	0,9981	0,9969	0,9974	0,9983	0,9982	0,9973	0,9878	0,9820
	Granica płynięcia [Pa]	2,9046	3,2813	3,5678	3,5927	3,7838	5,1664	3,2764	1,8958
Model Herschel-Bulkleya	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	0,0780	0,0808	0,0870	0,1289	0,1025	0,4346	1,8056	3,1293
	Wykładnik potęgowy [-]	0,8440	0,8382	0,8262	0,7873	0,8073	0,6877	0,5278	0,4872
	Współczynnik korelacji [-]	0,9987	0,9968	0,9974	0,9975	0,9981	0,9971	0,9991	0,9998
Lepkość pozorna przy 1022,04 [s ⁻¹] [Pa·s]		0,0295	0,0300	0,0300	0,0335	0,0310	0,0560	0,0725	0,0975

Tabela 4

Parametry reologiczne zaczynu cementowego sporządzonego na podstawie cementu portlandzkiego CEM I 42,5R o współczynniku w/c = 0,7, określone w temp. 20°C dla różnych modeli reologicznych

Parametry reologiczne		0	0,5	1	1,5	2	4	5	6
Czas wykonania pomiaru (od momentu zarobienia zaczynu), [h]									
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa·s]	0,0213	0,0239	0,0260	0,0232	0,0251	0,0380	0,0563	0,0736
	Współczynnik korelacji [-]	0,9093	0,9058	0,9052	0,8804	0,8976	0,8416	0,8318	0,8627
Model Binghama	Lepkość plastyczna [Pa·s]	0,0175	0,0196	0,0212	0,0185	0,0204	0,0296	0,0436	0,0586
	Granica płynięcia [Pa]	2,4873	2,8171	3,1017	3,0226	3,0927	5,4406	8,1867	9,6576
	Współczynnik korelacji [-]	0,9956	0,9942	0,9967	0,9964	0,9968	0,9901	0,9860	0,9783
Model Ostwalda de Waele	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	1,1037	1,1992	1,4572	1,4853	1,4719	2,4283	3,5582	3,1334
	Wykładnik potęgowy [-]	0,3627	0,3709	0,3476	0,3263	0,3409	0,3375	0,3407	0,4158
	Współczynnik korelacji [-]	0,9263	0,9337	0,9144	0,9114	0,9144	0,9435	0,9544	0,9856
Model Cassona	Lepkość Cassona [Pa·s]	0,0098	0,0110	0,0115	0,0096	0,0109	0,0156	0,0237	0,0360
	Granica płynięcia [Pa]	1,4884	1,6718	1,9162	1,9243	1,9294	3,3998	4,9780	5,1269
	Współczynnik korelacji [-]	0,9976	0,9967	0,9964	0,9970	0,9969	0,9976	0,9988	0,9941
Model Herschel-Bulkleya	Granica płynięcia [Pa]	2,0637	2,3307	2,7275	2,6061	2,6906	4,1542	5,3491	4,3798
	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	0,0506	0,0579	0,0478	0,0502	0,0498	0,1587	0,3999	0,8830
	Wykładnik potęgowy [-]	0,8455	0,8421	0,8818	0,8546	0,8698	0,7561	0,6795	0,6088
Współczynnik korelacji [-]		0,9982	0,9967	0,9981	0,9987	0,9986	0,9967	0,9991	0,9979
Lepkość pozorna przy 1022,04 [s ⁻¹] [Pa·s]		0,0195	0,0220	0,0240	0,0210	0,0230	0,0340	0,0490	0,0640

Tabela 5

Parametry technologiczne świeżego zaczynu uszczelniającego w zależności od czasu pomiaru od jego sporządzenia

Czas, po którym wykonano pomiar od momentu zarobienia zaczynu godzinny	w/c = 0,4		w/c = 0,5		w/c = 0,6		w/c = 0,7	
	Lepkość względna Kubek Forda nr 4 s	Rozlewność stożek AzNII mm	Kubek Forda s	Stożek AzNII mm	Kubek Forda s	Stożek AzNII mm	Kubek Forda s	Stożek AzNII mm
0,0	*	160	21	205	12	powyżej 260	powyżej 260	11,0
0,5	*	150	26	200	13	powyżej 260	powyżej 260	11,5
1,0	*	140	27	195	13,5	powyżej 260	powyżej 260	12,0
1,5	*	135	31	190	14,0	powyżej 260	powyżej 260	15,0
2,0	*	120	34	185	16,0	powyżej 260	powyżej 260	18,0
4,0	*	100		140	22,0	200	powyżej 260	20
5,0	-	-		130	33,0	185	220	22
6,0	-	-	-	-	40,0	165	200	25

* Ze względu na dużą lepkość pomiar nie mógł być wykonany.

Tabela 6

Parametry analizy statystycznej zależności rozlewności od lepkości plastycznej oraz rozlewności od czasu pomiaru dla zaczynu cementowego o współczynnikach w/c: 0,4 i 0,5

Parametr	x – lepkość plastyczna, [Pa*s]		x – czas pomiaru, [h]	
	y – rozlewność, [mm]		y – rozlewność, [mm]	
	w/c = 0,4	w/c = 0,5	w/c = 0,4	w/c = 0,5
Poziom ufności	0,7	0,95	0,95	0,95
Współczynnik korelacji R	0,44	0,9715	0,8582	0,9741
R ²	0,1936	0,9438	0,7365	0,9489
Współczynnik regresji a	-1131,3496	-918,0665	-13,8571	-18,8889
Wyraz wolny równania regresji b	294,0829	249,8956	152,6429	208,8889
Równanie ogólne regresji	$y = ax + b$			

Tabela 7

Parametry analizy statystycznej zależności czasu wypływu z kubka Forda nr 4 od lepkości plastycznej oraz czasu wypływu z kubka Forda nr 4 od czasu pomiaru dla zaczynu cementowego o współczynnikach w/c: 0,6 i 0,7

Parametr	x – lepkość plastyczna, [Pa*s]		x – czas pomiaru, [h]	
	y – czas wypływu z kubka Forda nr 4, [mm]		y – czas wypływu z kubka Forda nr 4, [mm]	
	w/c = 0,6	w/c = 0,7	w/c = 0,6	w/c = 0,7
Poziom ufności	0,99	0,99	0,98	0,96
Współczynnik korelacji R	0,9931	0,9888	0,9483	0,9129
R ²	0,9862	0,9777	0,8993	0,8335
Współczynnik regresji a	430,6408	355,4688	4,6232	2,2029
Wyraz wolny równania regresji b	1,3263	4,9497	8,442	9,6178
Równanie ogólne regresji	$y = ax + b$			

Analizując powyższe zależności statystyczne, można zauważyć, że parametr czasu ma istotny wpływ na zmianę własności reologicznych zaczynów uszczelniających. Bardzo wyraźnie widoczne jest to na przykładzie zależności funkcyjnych rozlewności od czasu pomiaru. Wraz z upływem czasu maleje rozlewność zaczynu, co związane jest z postępującym

gęstnieniem zaczynu, stopniowym wiązaniem oraz odparowywaniem wody. Sam proces badania rozlewności zaczynu nie jest procesem zbyt dokładnym i precyzyjnym dlatego pomiar ten powinien być traktowany umownie podczas projektowania procesu uszczelniania górotworu. Podobna zasada dotyczy pomiaru lepkości umownej za pomocą kubka Forda nr 4. Stąd też uzyskane wartości współczynników korelacji dla badanych wielkości nie są zbyt wysokie.

5. WNIOSKI

Wyniki modelowania statystycznego wskazują na dokładność analizowanych modeli z uzyskanymi wynikami z badań laboratoryjnych. Ich podsumowanie prowadzi do sprecyzowania następujących wniosków o charakterze ogólnym:

- 1) Wraz z upływem czasu od momentu zarobienia zaczynu do jego pomiaru obserwuje się:
 - spadek rozlewności zaczynu,
 - wzrost lepkości umownej zaczynu,
 - wzrost lepkości dynamicznej zaczynu,
 - wzrost lepkości pozornej zaczynu,
 - bardzo istotny wzrost współczynnika konsystencji zaczynu.
- 2) Czas przetłaczalności w temperaturze 20°C zaczynów cementowych na osnowie cementu portlandzkiego CEM I 42,5R wynosi odpowiednio:
 - dla współczynnika w/c = 0,4 – do 3 godzin,
 - dla współczynnika w/c = 0,5 – 4–5 godzin,
 - dla współczynnika w/c = 0,6 – ponad 6 godzin,
 - dla współczynnika w/c = 0,7 – ponad 6 godzin.
- 3) Spośród analizowanych modeli reologicznych badanych zaczynów na szczególną uwagę zasługuje model Herschela–Bulkleya. Model ten posiada najwyższe współczynniki korelacji ze wszystkich modeli reologicznych (najbliższe jedności). Należy go uznać za jeden z najdokładniej opisujących właściwości reologiczne badanych zaczynów. Wiąże on ze sobą zarówno właściwości plastyczne, jak i lepkie rzeczywistych cieczy.
- 4) Zaczyny stosowane w procesach wzmacniania i uszczelniania ośrodka gruntowego oraz masywu skalnego metodami wiertniczymi, a zwłaszcza iniekcji otworowej wymagają precyzyjnego określenia modelu reologicznego ze względu na dobór prawidłowe techniki technologii prac inżynierskich.

LITERATURA

- [1] Ferens W.: *Wpływ czasu na zmiany parametrów reologicznych zaczynów uszczelniających*. Praca niepublikowana. Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Kraków 2008
- [2] Gonet A., Stryczek S.: *Reologia wybranych zaczynów uszczelniających wykonanych z cementów Górażdże Cement S.A.* Sympozjum Naukowo-Techniczne „Cementy w budownictwie, robotach wiertniczych i inżynierskich oraz hydrotechnice”, Piła 2001

- [3] Góraǳe Cement S.A.: *Cement, Kruszywa, Beton w ofercie Grupy Góraǳe*. Katalog firmowy, Chorula, czerwiec 2007
- [4] Raczkowski J.: *Reologia cieczy wiertniczych*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1975
- [5] Stryczek S., Gonet A.: *Wymagania odnośnie zaczynów uszczelniających stosowanych w technologiach wiertniczych*. Symposium Naukowo-Techniczne „Cementy w budownictwie, robotach wiertniczych i inżynierskich oraz hydrotechnice”, Piła 2001
- [6] Stryczek S., Wiśniowski R., Skrzypaszek K.: *Wpływ plastyfikatorów na właściwości reologiczne zaczynów uszczelniających do prac geoinżynierskich*. *Wiertnictwo, Nafta, Gaz* (półrocznik AGH), t. 24/1, 2007
- [7] Wiśniowski R., Skrzypaszek K.: *Analiza modeli reologicznych stosowanych w technologiach inżynierskich*. *Wiertnictwo, Nafta, Gaz* (rocznik AGH), t. 23/1, 2006
- [8] Wiśniowski R., Stryczek S., Skrzypaszek K.: *Kierunki rozwoju badań nad reologią płynów wiertniczych*. *Wiertnictwo, Nafta, Gaz* (półrocznik AGH), t. 24, 2007