

**Aneta Sapińska-Śliwa*, Stanisław Stryczek*, Andrzej Gonet*,
Łukasz Mimier*, Tomasz Śliwa***

BADANIA ŚWIEŻYCH ZACZYNÓW USZCZELNIAJĄCYCH DO WYPEŁNIANIA OTWOROWYCH WYMIENNIKÓW CIEPŁA**

1. WPROWADZENIE

Aby otworowy wymiennik ciepła po wykonaniu mógł spełniać efektywnie swoje zadanie, przestrzeń pomiędzy rurami wymiennika a górotworem powinna być szczelnie wypełniona odpowiednim zaczynem. Dąży się do tego, aby otworowy wymiennik ciepła został wypełniony uszczelnieniem o możliwie największej zdolności do przewodzenia ciepła. Stwardniały zaczyn uszczelniający o takich właściwościach pośredniczy w swobodnym przepływie energii cieplnej z górotworu do czynnika krążącego w rurach wymiennika lub odwrotnie w procesie wygrzewania wymiennika. Z punktu widzenia ochrony wód podziemnych, głównym zadaniem zaczynu cementowego jest dokładne odizolowanie przewierconych wcześniej horyzontów wodonośnych tak, aby nie dochodziło do ich mieszania i zanieczyszczenia. Zaczyn cementowy powinien spełniać też kryterium minimalnej przepuszczalności przy skrajnie zmiennych warunkach temperaturowych. Znikoma przepuszczalność jest szczególnie znacząca z uwagi na możliwą agresywność wód podziemnych w stosunku do przewodu wymiennika i możliwy efekt korozji chemicznej. Świeży zaczyn cementowy powinien cechować się dobrą urabialnością, przetłaczalnością i po stwardnieniu, w postaci jednorodnego kamienia otaczać rury wymiennika na całej ich długości.

Dobranie zaczynu, który będzie najlepszy pod każdym z wyżej wymienionych względów jest bardzo trudne, dlatego przebadano trzy dostępne na polskim rynku mieszanki spoiw mineralnych przy różnych proporcjach w celu wytypowania wypełniacza o optymalnych parametrach dostosowanych do wypełniania otworowych wymienników ciepła.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Kraków

** Praca zrealizowana w ramach grantu MNiSW nr N N524 353738, umowa AGH nr 18.18.190.505

2. OPIS BADANYCH ZACZYNÓW

Badaniom poddano trzy różne gotowe mieszaniny wypełniające do otworowych wymienników ciepła: ThermoCem PLUS dystrybuowany przez Górażdże Cement, Hekoterm firmy Hekobentonity i Stüwa THERM 2000 firmy Stüwa Konrad Stükerjürgen GmbH. W celu porównania i odniesienia parametrów świeżych ww. mieszanek do zwykłego cementu portlandzkiego, przyjęto do zbadania również cement marki Cemex.

ThermoCem PLUS to mieszanka surowców mineralnych o zwiększonym przewodnictwie ciepła. Według producenta, ThermoCem PLUS jest hydraulicznym spoiwem, które przy odpowiedniej przeróbce może osiągnąć dwa razy wyższe wskaźniki przewodnictwa ciepła w porównaniu z tradycyjnymi dostępnymi materiałami wypełniającymi [1]. Produkt dystrybuowany przez Górażdże Cement to szary, lekki, bardzo drobno zmielony, pulchny proszek (rys. 1).

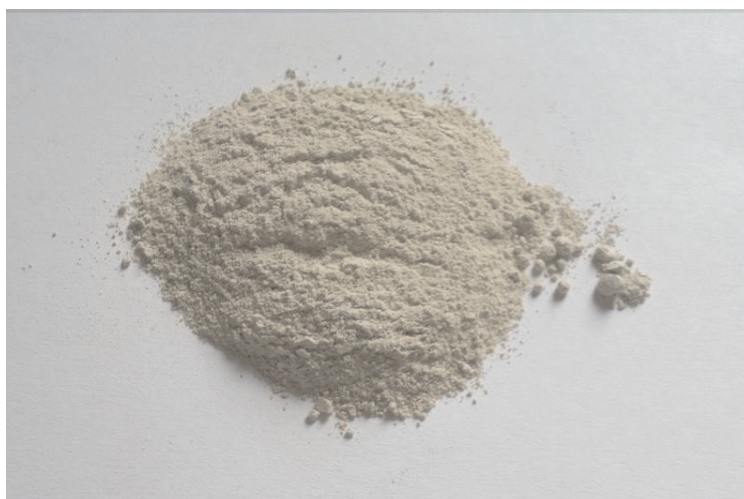


Rys. 1. Próbką mieszaniny ThermoCem PLUS

Produkt firmy Hekobentonity – Hekoterm to wg karty technicznej produktu, łatwy do rozmieszania, suchy proszek, dający tiksotropową zawiesinę, która jest bardzo dokładnym wypełniaczem przestrzeni pierścieniowej pomiędzy rurami wymiennika a górotworem. Izolacja horyzontów wodonośnych i szczelność wypełnienia to kolejne zalety, o których przekonuje producent [2]. Hekoterm ma strukturę i kolor drobnego piasku (rys. 2). Jest dużo cięższy od ThermoCemu. Produkt może zawierać spore ilości piasku kwarcytowego, który jest dobrym przewodnikiem ciepła.



Rys. 2. Próbką środka do wypełniania wymienników otworowych Hekoterm



Rys. 3. Próbką mieszaniny o nazwie Stüwa Therm 2000

Kolejną gotową mieszanką użytą do badań jest wytwór niemieckiej firmy STÜWA – Stüwa THERM 2000. Do tego produktu w odróżnieniu od Stüwa Therm 2000 „z” należy dodać podczas przygotowywania materiał wiążący w postaci cementu. Stüwa Therm 2000 jest brązowo-białą (beżową) mieszanką (rys. 3), o 25–30% zawartości gliny, która wg producenta dodawana jest w celu polepszenia właściwości chłonnych wody. Z karty technicznej

produktu można się dowiedzieć, iż mieszanka zawiera przesiane ziarna kwarcu o rozmiarze ziarna zwykle < 0,8 mm. Preparat przeznaczony jest tylko do otworów, w których czynnik krążący w wymienniku pracuje w temperaturze powyżej punktu zamarzania [3].

Receptury poszczególnych mieszanek różniły się współczynnikami wodno-mieszaninowymi (w/m). Każda mieszanka do wypełniania otworowych wymienników ciepła była przygotowywana w postaci trzech różnych w/m, w tym jeden współczynnik był zgodny z zaleceniami producenta. W tabelach od 1 do 4 podano ilości poszczególnych składników w mieszaninach 4 receptur.

Tabela 1

Receptura zaczynu uszczelniającego na bazie środka ThermoCem

Produkt			ThermoCem PLUS		
Współczynnik w/m			0,7	0,8	0,9
Woda		g	1200	1500	1500
Składniki stałe	ThermoCem	g	1714,3	1875	1666,7
	Cement	g	–	–	–
	Suma	g	1714,3	1875	1666,7

Tabela 2

Receptura zaczynu uszczelniającego na bazie środka Hekoterm

Produkt			HEKOTERM		
Współczynnik w/m			0,5	0,6	0,7
Woda		g	1000	1262	1200
Składniki stałe	Hekoterm	g	2000	2100	1714,3
	Cement	g	–	–	–
	Suma	g	2000	2100	1714,3

Tabela 3

Receptura zaczynu uszczelniającego na bazie środka Stüwa Therm 2000

Produkt			Stüwa Therm 2000		
Współczynnik w/m			0,47	0,57	0,67
Woda		g	1200	1300	1200
Składniki stałe	Stüwa Therm 2000	g	2220,26	2000	1557,47
	Cement	g	332,94	300	233,55
	Suma	g	2553,2	2300	1791,02

Tabela 4

Receptura zaczynu uszczelniającego na bazie cementu CEMEX

Produkt			Cement Cemex		
Współczynnik w/m			0.6	0.8	1.0
Woda		g	900	1200	1000
Składniki stałe	Cemex	g	1500	1500	1000
	Cement	g	–	–	–
	Suma	g	1500	1500	1000

Przygotowanie każdej receptury rozpoczęto od odmierzenia odpowiedniej ilości poszczególnych składników, a następnie dokładnie ich wymieszanie mieszadłem obrotowym. Podczas mieszania stopniowo wsypywano gotowe mieszanki wypełniaczy do wody zarobowej. W przypadku środka Stüwa Therm 2000 najpierw z wodą rozmieszano Cemex, a następnie dodano wypełniacz.

Uzyskane po wymieszaniu zaczynu posłużyły do wykonania wcześniej założonych badań. Z urobionych zaczynów wykonano badania podstawowych parametrów świeżych zaczynów cementowych.

3. BADANIA ŚWIEŻYCH ZACZYNÓW CEMENTOWYCH

Wszystkie parametry świeżych zaczynów cementowych zbadano na podstawie normy [4]. Badania uwzględniały pomiary następujących parametrów:

- gęstości,
- lepkości umownej,
- rozlewności,
- odstoju,
- pH filtratu,
- filtracji właściwej (rzeczywistej),
- parametrów reologicznych:
 - lepkości plastycznej,
 - lepkości pozornej,
 - granicy płynięcia.

Badania świeżych zaczynów cementowych do wypełniania otworowych wymienników ciepła zostały przeprowadzone w Laboratorium Płynów Wiertniczych na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH w Krakowie.

Pomiar gęstości został wykonany za pomocą wagi ramiennej typu Baroid. Wyniki pomiarów gęstości znajdują się w tabeli 5, gdzie zestawione zostały wszystkie wyniki badanych parametrów zaczynów.

Tabela 5
Zestawienie średnich wartości parametrów świeżych zaczynów cementowych

	ThermoCEM Plus				Hekoterm			Stüwa Therm 2000 + Cemex			CEMEX		
	w/m	0,7	0,8	0,9	0,5	0,6	0,7	0,47	0,57	0,67	0,6	0,8	1,0
Gęstość	g/cm ³	1,55	1,47	1,41	1,71	1,56	1,32	1,80	1,71	1,62	1,73	1,6	1,49
Lepkość plastyczna	mPas	44,5	28,3	20,5	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	28,8	13,7	8,7
Lepkość umowna	s	44	19,3	13,7	11,7	12,7	10,7	brak wypływu	brak wypływu	18,33*	25,7	12,7	12
Rozlewność	mm	183	260	277	280	>280	>280	97	147	193	213	273	>280
Objętość filtratu	cm ³	113,3	131,7	141,7	135	158,3	155	95	108,3	131,7	91,7	125	155
pH filtratu	–	9	9	9	9	9	9	8	8	8	11	11	11
Filtracja właściwa	cm ³ /s	0,7751	1,0367	1,0415	4,7182	4,9496	6,5260	0,0561	0,0602**	0,0731**	1,9243	3,1288	3,6999

n.m. niemierzalne
* po tym czasie wypływ ustal
** czas pomiaru 30min (brak przebiecia)

Tabela 6
Wartości odstoju poszczególnych zaczynów

	ThermoCEM Plus			Hekoform			Stitiwa Therm 2000 + Cemex			CEMEX			
	w/m	0,7	0,8	0,9	0,5	0,6	0,7	0,47	0,57	0,67	0,6	0,8	1,0
Odstój	%	>1,0	>1,0	>1,0	20	17	15	>1,0	>1,0	>1,0	>1,0	>1,0	>1,0

Kubek Forda posłużył do zbadania lepkości umownej, która określana jest jako czas wypływu zaczynu ze stożkowego kubka Forda nr 4. Badanie przeprowadza się poprzez zatkanie wypływu i nalanie zaczynu do kubka, a następnie zmierzenie czasu od odetkania wypływu do całkowitego wypłynięcia badanego medium z aparatu. Wraz ze wzrostem lepkości zaczynu, czas jego wypływu z kubka powinien wzrastać. Czasy wypływu podano w tabeli 5.

Parametr rozlewności w przybliżony sposób informuje nas o stopniu przetłaczalności zaczynu w otworze wiertniczym i przez pompę cementacyjną. Badanie wykonuje się stożkiem ściętym AzNII, a odczyt odbywa się na wyskalowanej podstawie. Im bardziej rozlewny jest zaczyn tym lepsza jest jego przetłaczalność. Wyniki rozlewności ujęto w tabeli 5.

Filtrację badano prasą filtracyjną Baroid przy różnicy ciśnień 0,7MPa, z tą uwagą, iż różnica ta powinna być osiągnięta w czasie nie dłuższym niż 5 sekund. Zaczyn cementowy powinien cechować się jak najmniejszą filtracją z uwagi na wody podziemne i ich ochronę. Badanie trwa do momentu przebicia przez strumień powietrza osadu filtracyjnego, lecz nie dłużej niż 30 minut. W otrzymanych filtratach zanurzano papierki lakmusowe w celu określenia ich kwasowości/zasadowości. Wyniki filtracji i pH podano w tabeli 5.

Pomiar parametrów reologicznych wykonano przy użyciu wiskozymetru obrotowego Chan 35 API Viscometer. Lepkościomierz ten posiada zakres 12 prędkości obrotowych przy płynnej regulacji obrotów od 1 do 600. Po pomiarze kąta skręcenia przy prędkości obrotowej $\phi = 600$ obr/min oraz $\phi = 300$ obr/min można było obliczyć lepkość plastyczną wg wzoru:

$$\eta_p = \phi_{600} - \phi_{300} \text{ [mPas]} \quad (1)$$

Na podstawie wskazań wiskozymetru przy ww. prędkościach obrotowych obliczono lepkości plastyczne zaczynów. Wyniki zawarto w tabeli 5.

Każdą recepturę poszczególnych zaczynów uszczelniających po zarobieniu przebadano ze względu na odstój. Użyto do tego celu cylindra pomiarowego o objętości 500 ml z wyskalowaną podziałką. Wyniki odstojów zestawiono w tabeli 6.

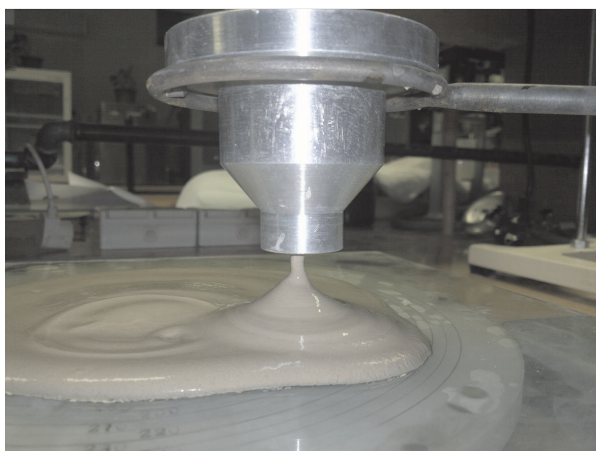
4. ANALIZA WYNIKÓW

Gęstość

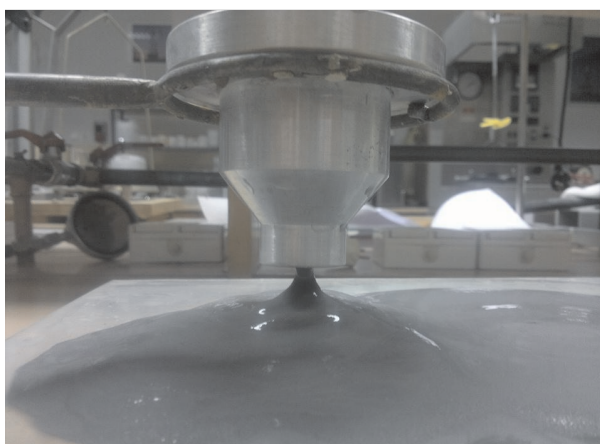
Gęstość zaczynu maleje w każdej recepturze wraz ze wzrostem współczynnika wodno-mieszczącego. Można uznać że zaczyn wraz ze wzrostem w/m jest coraz rzadszy ze względu na większą ilość wody zarobowej w stosunku do suchych składników. Gęstość ThermoCemu nie jest zbyt duża i nie odbiega od typowych gęstości zaczynów cementowych. Nie stwarza to niepotrzebnego nadciśnienia wywieranego na dno otworu przez słup cementu w otworze wiertniczym. Wartość masy właściwej zaczynu cementowego na bazie Hekotermu i Stüwa Thermu jest duża. Wiązać się to może z obecnością piasku kwarcowego w tych mieszkach.

Lepkość

Po wykonaniu badań, można stwierdzić, iż lepkość zarówno plastyczna, jak i umowna, maleje wraz ze wzrostem współczynnika w/m . Problemem był pomiar lepkości Hekotermu i Stüwa Thermu za pomocą lepkościomierza obrotowego typu Chan. Z uwagi na zawartość drobin kwarcu w tych zaczynach, tuleje viskozymetru zacierały się uniemożliwiając tym samym wiarygodny pomiar obydwu mieszanek. Podczas badania lepkości umownej Stüwa Thermu i ThermoCemu PLUS kubkiem Forda zaobserwowano zjawisko tiksotropii zaczynu (rys. 4 i 5). Efekt tiksotropii Stüwa Thermu 2000 spowodował, że podczas pomiaru receptury o współczynniku $w/m = 0,67$, wpływ z kubka Forda po chwili ustał. Lepkość zaczynów o współczynnikach $w/m = 0,47$ i $w/m = 0,57$ uniemożliwiła wpływ z aparatu pomiarowego.



Rys. 4. Efekt tiksotropii dla zaczynu na bazie środka Stüwa Therm 2000



Rys. 5. Efekt tiksotropii ThermoCemu Plus

Efekty tiksotropii w tych zaczynach spowodowane były zawartością w ich składzie minerałów ilastych, które przy małych prędkościach ścinania absorbują część wolnej wody zarobowej.

Rozlewność

Rozlewność jest ściśle związana ze współczynnikiem wodno-mieszaninowym. Im współczynnik jest wyższy tym rozlewność większa. Dotyczy to wszystkich badanych receptur. Zaczyny, które poddane zostały badaniom, cechują się dobrą przetłaczalnością. Jedynie Stüwa Therm 2000 przy niskim w/m cechuje się średnią przetłaczalnością, o której świadczy dość niska rozlewność – 97 mm.

Kwasowość/zasadowość filtratu

Po wykonaniu badania pH filtratów poszczególnych zaczynów, można stwierdzić, że w porównaniu do pH filtratu zwykłego cementu, pH filtratów badanych wypełniaczy jest dość niskie. Przy pH cementu Cemex równym 11, świadczącym o jego zasadowości, pH Thermocemu, Hekotermu i Stüwa Thermu jest słabo zasadowe i oscyluje w granicach 8–9.

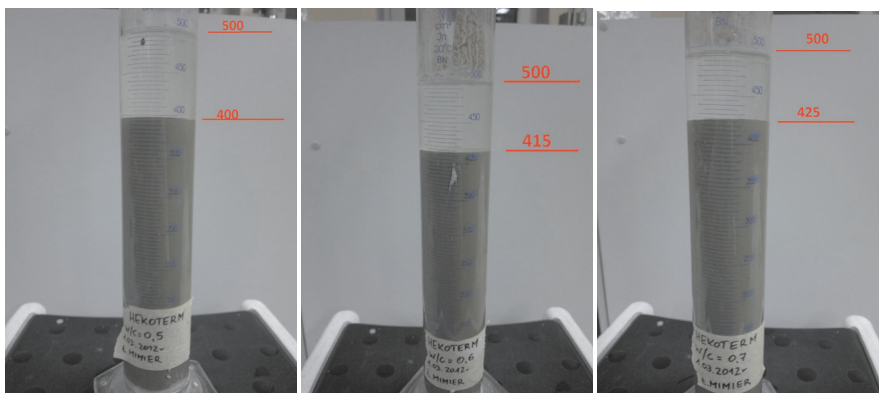
Filtracja właściwa (rzeczywista)

Aby oddziaływanie zaczynu na strefę przyotworową było jak najmniejsze, musi się on cechować możliwie najmniejszą filtracją. Z przebadanych receptur wypełniaczy, najmniejszą filtracją cechuje się produkt Stüwa Therm 2000. Podczas badania za pomocą prasy filtracyjnej, w przypadku w/m = 0,57 i w/m = 0,67, w ciągu 30 minut pomiaru nie nastąpiło przebicie próbki przez strumień powietrza, co świadczy o słabym oddawaniu filtratu przez zaczyn i jego odporności na ciśnienie. Również pod względem ilości oddanego przez zaczyn filtratu, Stüwa Therm 2000 wypadł najlepiej, gdyż jego próbka oddała najmniejszą objętość płynu przy każdym współczynniku w/m. Najgorzej z badanych receptur wypadł Hekoterm, który cechuje się filtracją właściwą rzędu od około 4,7 do 6,5 cm³/s. Objętość oddanego filtratu przez Hekoterm to 135 cm³ przy w/m = 0,5 do 158,3 cm³ przy w/m = 0,6. Oznacza to, że produkt ten niekorzystnie wpływa na strefę przyotworową i może znacząco wpłynąć na jakość wód podziemnych.

Odstój

Odstój ma zasadniczy wpływ na jednorodność wypełnienia, a co za tym idzie na przewodzenie ciepła i ochronę wymiennika na całej jego długości. Zaobserwowano, że największym odstojem cechuje się Hekoterm. Pozostałe zaczyny posiadają odstój poniżej 1% co świadczy o jednorodnej ochronie wymiennika po zastosowaniu prawidłowej technologii cementowania. Największym odstojem (20%), cechuje się Hekoterm przy współczynniku w/m = 0,5 (rys. 6).

Można stwierdzić, że po zacementowaniu 100 metrowego otworu, efekt sedymentacji sprawi, że słup wody zajmie 20 metrów w górnej części otworu. Odstoje rzędu 17 i 15% jakimi cechują się pozostałe receptury Hekotermu, odpowiednio w/m = 0,6 i w/m = 0,7 (rys. 6), również są bardzo duże.



Rys. 6. Odstój – Hekoterm w/m = 0,5; w/m = 0,6 i w/m = 0,7

5. DOBÓR MODELU REOLOGICZNEGO DLA BADANYCH ZACZYNÓW

Dobranie odpowiedniego modelu reologicznego do opisu zaczynów cementacyjnych umożliwia dokładne określenie rzeczywistych oporów przepływu w systemie cementacyjnym oraz pozwala na zoptymalizowanie parametrów technologii zatłaczania mieszaniny do otworu. Optymalne modele reologiczne dla badanych zaczynów dobrano za pomocą programu Rheo Solution.

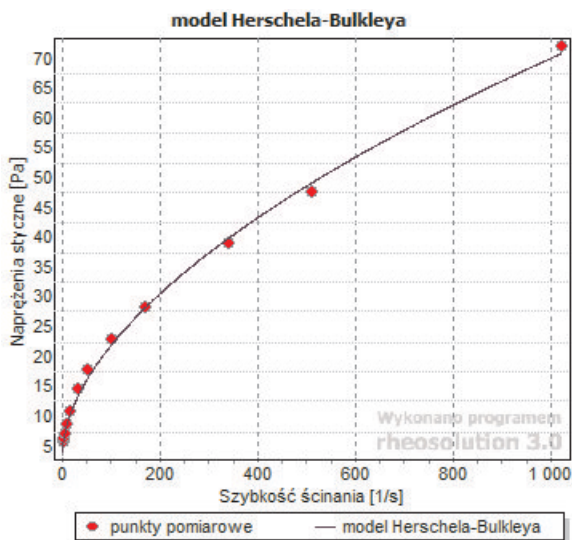
Aby móc wprowadzić dane do programu, dokonano pomiaru kątów odchylenia za pomocą lepkościomierza obrotowego Chan. Zbadano ThermoCem Plus i w celach porównawczych – cement Cemex. Wyniki zestawiono w tabeli 7. Badanie lepkości Hekotermu i Stüwa Thermo 2000 na wiskozymetrze nie było możliwe do wykonania ze względu na zawartość piasku.

Tabela 7

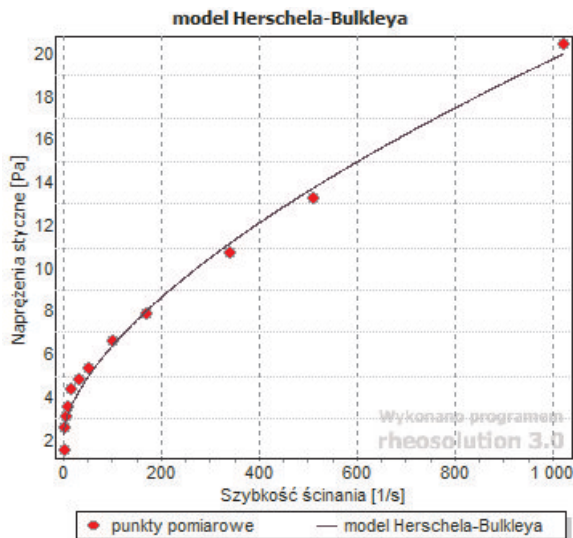
Średnie kąty odchylenia w zależności od obrotów i współczynnika w/m

	Produkt	ThermoCem PLUS			CEMEX		
	w/m	0,7	0,8	0,9	0,6	0,8	1,0
Prędkość obrotowa, s ⁻¹	1	11	4	3,5	5	3	2
	2	12	5,5	4	9	5	2,5
	3	13,5	6,5	4,5	12	6	3
	6	17	8	5	16,5	7	3,5
	10	21	9,5	6	21	8,5	4
	20	28,5	11,5	6,5	26	9,5	5
	30	35	13,5	7,5	29,5	10,5	5,5
	60	45	17,7	10	36,5	13	6,5
	100	55,5	23	12,5	44	15,5	8
	200	76,5	34	19,5	52,5	21	11
	300	93	44,5	25	72,5	26	14,5
	600	141	73	46,5	103	40	23

Optymalnym modelem reologicznym dla wszystkich receptur ThermoCemu Plus okazał się model Herschela–Bulkleya. Współczynnik korelacji wahał się od 0,9403 do 0,9990, a więc były to korelacje bardzo wysokie lub pełne (rys. 7). Modelem, który najbardziej pasuje do wszystkich receptur zaczynu cementu Cemex, jest również model Herschela–Bulkleya. Współczynniki korelacji wynoszą od 0,9957 do 0,9973, co oznacza, że korelacja była pełna (rys. 8).



Rys. 7. Graficzna ilustracja krzywej płynięcia zaczynu ThermoCemu Plus



Rys. 8. Graficzna ilustracja krzywej płynięcia zaczynu cementu Cemex

6. WYZNACZENIE OPORÓW PRZEPŁYWU DLA CIECZY HERSCHELA–BULKLEYA

W procesie hydraulicznym, którym jest cementowanie, ważnym elementem jest zdefiniowanie zależności pomiędzy strumieniem tłoczonej cieczy, a powstającymi przy tym oporami przepływu w systemie tłoczącym. Opory uzależnione są od wielu czynników, np.: rodzaju przepływającej cieczy, geometrii przepływu, właściwości pośrednich elementów przez które przepływa medium [6].

Jednostkowe opory przepływu cieczy wiertniczych w rurach wyznacza się ze wzoru Fanninga:

$$\Delta p = \frac{2 f l v_s^2 \rho}{d} \quad (2)$$

Wartość współczynnika f wyznaczamy oblicza się ze wzoru:

$$f = a \overline{\text{Re}}^{-b} \quad (3)$$

gdzie:

$$a = e^{\left(\frac{\sum_{i=1}^m \ln y_i + b \sum_{i=1}^m \ln x_i}{m} \right)} \quad (4)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^m \ln x_i \sum_{i=1}^m \ln y_i - m \sum_{i=1}^m \ln x_i \ln y_i}{m \sum_{i=1}^m (\ln x_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^m \ln x_i \right)^2} \quad (5)$$

gdzie:

$$x_i = \frac{\overline{\rho v_i d}}{\eta_{ei}} \quad (6)$$

$$y_i = \frac{\Delta p_i}{\Delta L} \frac{d}{2 \overline{\rho v_i}^2} \quad (7)$$

Aby określić rzeczywiste opory przepływu przepływającej cieczy, która opisywana jest modelem Herschela–Bulkleya, należy za pomocą metod numerycznych wyznaczyć lepkość ekwiwalentną cieczy. Wartości współczynników a i b można określić za pomocą badań laboratoryjnych.

7. WNIOSKI

1. Odpowiednie zacementowanie otworowego wymiennika ciepła, gwarantuje optymalne jego zabezpieczenie podczas długoletniej pracy.
2. Aby przepływ ciepła pomiędzy górotworem a nośnikiem ciepła w wymienniku był niezaburzony, wypełniacz powinien cechować się możliwie największą przewodnością cieplną.
3. Stwardniały zaczyn uszczelniający, którym jest zacementowany wymiennik musi jednorodnie wypełniać przestrzeń pierścieniową.
5. Po wykonanych badaniach można stwierdzić, że receptura o współczynniku w/m zalecanym przez producenta, zazwyczaj jest optymalna i nie ma potrzeby jej modyfikacji.

LITERATURA

- [1] Materiały informacyjne – karta techniczna produktu ThermoCem PLUS.
- [2] Karta techniczna produktu Hekoterm firmy Hekobentonity.
- [3] Katalog firmy Hydroglobal – dystrybutora produktu Stüwa Therm 2000 i katalog firmy Stüwa Konrad Stükerjürgen GmbH.
- [4] PN-EN ISO 10426-2: *Przemysł naftowy i gazowniczy. Cementy i materiały do cementowania otworów wiertniczych. Część 2: Badania cementów wiertniczych*. Maj 2006.
- [5] Skrzypaszek K.: *Program „Rheo Solution” jako komputerowe narzędzie doboru modelu reologicznego cieczy wiertniczych*. Zagadnienia interdyscyplinarne w górnictwie i geologii, IV Konferencja Doktorantów po patronatem Prorektora Politechniki Wrocławskiej dra hab. inż. Jerzego Świątka, prof. PW: Szklarska Poręba, 2004 r., Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej nr 107, Konferencje nr 39, Oficyna Wydawnicza PW, Wrocław 2004, s.145–157.
- [6] Bielewicz D.: *Płyny wiertnicze*. Wydawnictwo AGH, Kraków 2009.