

Rafał Wiśniowski*, Stanisław Stryczek*, Krzysztof Skrzypaszek*

KIERUNKI ROZWOJU BADAŃ NAD REOLOGIA PŁYNÓW WIERTNICZYCH**

1. WSTĘP

W ostatnich latach, można zaobserwować znaczny rozwój reologii jako nauki o odkształceniach i przepływie materii. Bardzo szerokie spektrum zastosowań, szczególnie przemysłowych wynika z faktu, że zdecydowana większość gałęzi przemysłu na poszczególnych etapach produkcyjnych wykorzystuje płyny technologiczne. Optymalizacja przepływu cieczy lub gazów oraz właściwy dobór ich parametrów reologicznych pozwala na zwiększenie oszczędności materiałowych i energetycznych oraz poprawienie jakości produkcji i przetwórstwa. Ma także duże znaczenie dla naszego życia i zdrowia. Praktycznie w dowolnej dziedzinie działalności ludzkiej można znaleźć aplikację reologii płynów, ale szczególnie istotna jest ona w: przemyśle spożywczym, farmaceutycznym i kosmetycznym, przetwórstwie tworzyw sztucznych, ceramice, technologii przetwórstwa ropy naftowej, metalurgii i odlewnictwie, chemii polimerów i chemii gospodarczej, medycynie i inżynierii biomedycznej, dentyście, zootechnice i rolnictwie, ochronie środowiska, wiertnictwie, górnictwie i geoinżynierii.

W każdej nauce uzyskana wiedza stymuluje konieczność jej pogłębiania. Ustalane nowe hipotezy naukowe wymagają przeprowadzenia procesu dowodowego, w którego wyniku przyjmuje się je jako obowiązujące prawa, albo odrzuca, stawiając w ich miejsce nowe hipotezy. Istnieje więc ścisły związek pomiędzy aktualnym stanem wiedzy a rozwojem metod badawczych. Również w reologii można zaobserwować na przestrzeni mijających lat sprzężenie zwrotne pomiędzy uzyskaną wiedzą a stosowanymi metodami badawczymi. Opracowywane nowe teorie wymagały bowiem tworzenia nowych narzędzi badawczych. Badania eksperymentalne wykonywane coraz nowocześniejszymi przyrządami pomiarowymi oraz stosowanie nowych metod interpretacji wyników pomiarów (sieci neuronowe, algorytmy genetyczne) pozwalały na formułowanie nowych tez naukowych opisujących zachowanie ciał rzeczywistych.

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

** Praca zrealizowana w ramach badań własnych nr 10.10.190.317

2. RYS HISTORYCZNY BADAŃ NAD REOLOGIAŁ MATERII

Zjawiska reologiczne ujawniają się przede wszystkim w postaci znacznych i narastających deformacji ciał uważanych za stałe. Przykładami z codziennej obserwacji może być deformacja wyjętej z lodówki i rzuconej na gorącą patelnię kostki masła, uginanie się betonowych wsporników czy trwałe odkształcenie się elementów wykonanych z tworzyw sztucznych. Pierwszymi, którzy te zjawiska zaobserwowali z myślą o zastosowaniach inżynierskich, byli L. Vicat (1831) – w drutach stalowych używanych do splatania lin stosowanych przy wznoszeniu wiszących mostów, oraz C. Weber (1835) – we włóknach jedwabiu. Impuls do systematycznych prac naukowych nad tymi procesami pojawił się na początku XX wieku ze strony nauk chemicznych, w związku z rozwojem technologii wytwarzania i przeróbki tworzyw sztucznych. Za datę powstania reologii jako odrębnej gałęzi mechaniki uważa się rok 1924, w którym odbyło się sympozjum American Chemical Society na temat plastyczności. W 1928 w Anglii powstało Society of Rheology. Z reologią jako dziedziną mechaniki związanych było wielu wybitnych uczonych: J.C. Maxwell, L.E. Boltzman, V. Volterra czy A. Einstein, który w roku 1905 wykonał pracę doktorską o ruchu kul zawieszonych w cieczy lepkiej. Znacznym rozwój reologii nastąpił w związku z rozwojem przemysłów stosujących wysokie temperatury (odlewnictwo metalurgia) oraz energetyki jądrowej. W budownictwie przedmiotem szczególnego zainteresowania stał się beton, podstawowy materiał konstrukcyjny, który właściwości reologiczne wykazuje już w temperaturze pokojowej.

Reologia stawia wysokie wymagania co do strony formalnej opisu zjawisk: konieczna jest znajomość równań całkowych i różniczkowych, rachunku operatorowego oraz metod numerycznych. Mimo nagromadzenia znacznego materiału doświadczalnego, ciągle poszukuje się nowych teorii, a w związku z rozwojem inżynierii materiałowej powstają nieznanne dotychczas materiały, których zachowanie się często jest zależne od czasu.

W latach 70. w różnych ośrodkach naukowych na świecie zintensyfikowano badania poświęcone zachowaniu się cieczy nienewtonowskich, poprzez próby opisanie wpływu szybkości ścinania na pojawiające się w nich naprężenia styczne. Wówczas w wielu dziedzinach przemysłu (np. w przemyśle lakierniczym, spożywczym czy budownictwie), uważano lejek Marscha za wystarczająco dobre narzędzie do oceny jakości próbek płynów technologicznych. Termostatowane lepkościomierze rotacyjne wypływowe Redwooda i Seyboldta oraz podobne rozwiązania konstrukcyjne kosztowały po około 100 dolarów. Koszt lepkościomierzy rotacyjnych z regulowaną szybkością obrotów wirnika (np. Fann) wynosił około 10 000 dolarów. Przyrządy te były więc stosunkowo drogie w porównaniu ze stosowanymi powszechnie lejkami Marscha, a aktualny stan wiedzy nad zachowaniem materii nie stymulował do ich aplikacji. W latach 70. szeroko znane były prace profesora Karla Weissenberga, który już w latach 40. wykazał, że większość ośrodków płynnych po przyłożeniu naprężenia ścinającego wykazuje zarówno przepływ, jak i deformację sprężystą. Naukowiec ten wynalazł tak zwany „reogoniometr”, za pomocą którego można było po raz pierwszy zmierzyć zarówno sygnał naprężenia ścinającego, definiujący lepkość, jak i sygnał siły normalnej określający sprężystość przy danej szybkości ścinania. Ten wysokiej klasy (nawet według współczesnych standardów) reometr był duży i ciężki, a ponadto kosztował około ćwierć miliona dolarów, co sprawiło, iż trafił on jedynie do kilku laboratoriów badawczych na świecie. W ciągu 30 lat sprzedano tylko kilkaset tych aparatów i w końcu porzucono ich produkcję [8].

Rosnące zainteresowanie pomiarami właściwości reologicznych w ciągu ostatnich dziesięcioleci sprawiło, iż raptownie wzrosła sprzedaż lepkościomierzy rotacyjnych, wykorzystywanych zarówno do celów przemysłowych, jak i do badań naukowych. Powstało wiele firm na rynku specjalizujących się w produkcji tego typu urządzeń (np. Brookfield, Haake). W obecnych czasach obróbka maszynowa jest tak precyzyjna, że za normalne uważa się, iż łożyska mają luzu rzędu mikronów, a czujniki odkształceń są tak czułe, iż potrafią podzielić obrót o 360 stopni na milion lub więcej części. Dzięki temu udało się skonstruować nowoczesne reometry o takiej dokładności, która była niemożliwa do osiągnięcia w ciągu ostatnich dwudziestu lat.

Przykłady rozwoju rozwiązań konstrukcyjnych reometrów przedstawiono na rysunkach 1–9.



Rys. 1. Lejek Marscha

Źródło: Katalog firmowy Fann Instruments Company [13]



Rys. 2. Przykład lepkościomierzy z początku XX w., działających na zasadzie kontrolowanego naprężenia

Źródło: Howard A. Barnes, Derek Bell, Korea-Australia Rheology Journal, vol. 15 [10]



Rys. 3. Lepkościomierz MacMichaela działający na zasadzie kontrolowanego naprężenia (lata 30. XX w.)
Źródło: Howard A. Barnes, Derek Bell, Korea-Australia Rheology Journal, vol. 15 [10]



Rys. 4. Profesjonalny lepkościomierz rotacyjny Mark One firmy Deer Instruments (lata 70. XX w.)
Źródło: Katalog firmowy Deer Instruments [12]



Rys. 5. Lepkościomierz obrotowy Fann z (lata 70. XX w.)
Źródło: Katalog firmowy Fann Instruments Company [13]



Rys. 6. Lepkościomierz kulkowy Hopplera (model z lat 80. XX w.)



Rys. 7. Lepkościomierz obrotowy M3500 firmy Grace wraz z oprogramowaniem (model z lat 90. XX w.)
Źródła własne



Rys. 8. Lepkościomierz obrotowy Brookfield wraz z oprogramowaniem dedykowanym Rheocalc (model 2007)

Źródło: Katalog firmowy Brookfield [11]



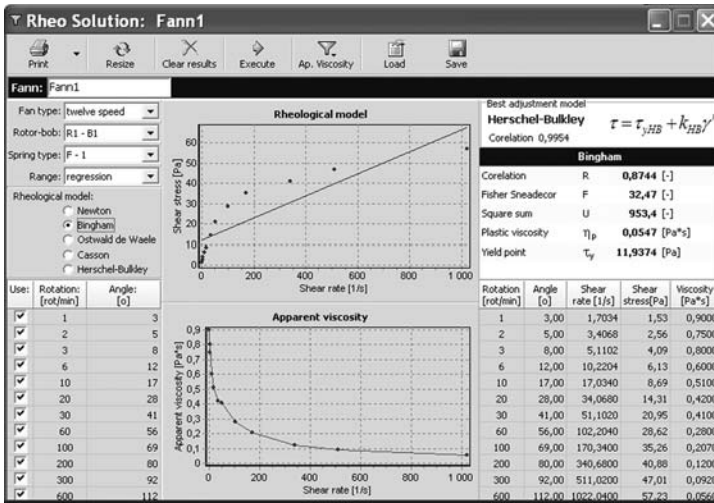
Rys. 9. Lepkościomierz obrotowy firmy Haake (model 2007)
Źródło: Katalog firmowy Haake GmbH [14]

Wielki postęp w konstrukcjach przyrządów badawczych nie miałby racjonalnego uzasadnienia bez możliwości na szeroką skalę gromadzenia, przetwarzania i interpretacji wyników. Stało się to możliwe dzięki powszechnemu zastosowaniu komputerów. Nie można prowadzić dynamicznych testów kontroli jakości bez użycia komputera, potrafiącego wykonywać analizę danych w czasie rzeczywistym. Tylko dzięki komputerom, można ocenić metodą regresji wyniki testów pełzania i powrotu do stanu normalnego z podziałem na udziały wywołane sprężystością i lepkością, w czasie ścinania i w czasie powrotu do stanu wyjściowego. Wynik pomiaru uzyskiwany jest automatycznie w czasie minuty lub dwóch, a do obsługi nie potrzeba ludzi z umiejętnością obliczeń matematycznych. Obecnie najczęściej komputer jest podstawowym elementem wchodzącym w skład zestawu służącego do pomiaru parametrów reologicznych. Zdecydowana większość lepkościomierzy posiada wyjście cyfrowe oraz przeznaczone oprogramowanie dla konkretnych modeli, które pozwala analizować wyniki w czasie rzeczywistym. Oprogramowanie takie najczęściej posiada możliwości analizy w zależności od wymagań użytkownika, wykorzystuje metody statystyczne i analityczne rozwiązania w postaci modeli reologicznych cieczy. Współpraca tych urządzeń odbywa się w sprawdzony sposób, lepkościomierz najczęściej posiada wyjście cyfrowe zgodne ze standardem RS 232 (starsze) lub USB, odpowiedni przewód łączący z komputerem, ewentualne sterowniki i program, który odczytuje sygnały cyfrowe na wyjściu i przetwarza je na formę wygodną dla użytkownika. Częstym elementem takiego oprogramowania są funkcje eksportujące dane z lepkościomierza do ogólnie stosowanych formatów zapisu arkuszy kalkulacyjnych (np. Excel), co daje użytkownikowi możliwość dalszej analizy we własnym zakresie. Przykładem takiego oprogramowania może być Rheocalc, który jest dołączany do większości nowych modeli firmy Brookfield (rys. 8.) Program ten pozwala sterować lepkościomierzem, programować pomiary w czasie bez udziału laboranta oraz odczytywać i gromadzić wyniki. Program wykorzystuje do analizy proste metody statystyczne, opierając się również na podstawowych modelach reologicznych cieczy. Innym rozwiązaniem na rynku jest oprogramowanie Rheowin (rys. 10) przeznaczone do urządzeń firmy Haake. Funkcjonalność tego programu jest analogiczna z programem Rheocalc.



Rys. 10. Oprogramowanie RheoWin firmy Haake dedykowane lepkościomierzom obrotowym tej firmy
 Źródło: Katalog firmowy Haake GmbH [14]

Istnieją również rozwiązania niezależne, które nie są przeznaczone dla urządzeń konkretnych firm. Ich podstawową zaletą jest uniwersalność, gdyż można jest stosować niezależnie od aparatury, którą się posługujemy. Do podstawowych wad należy zaliczyć brak komunikacji z urządzeniem na etapie przesyłania danych. Przykładem takiego oprogramowania jest RheoSolution stworzony na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH (rys. 11).



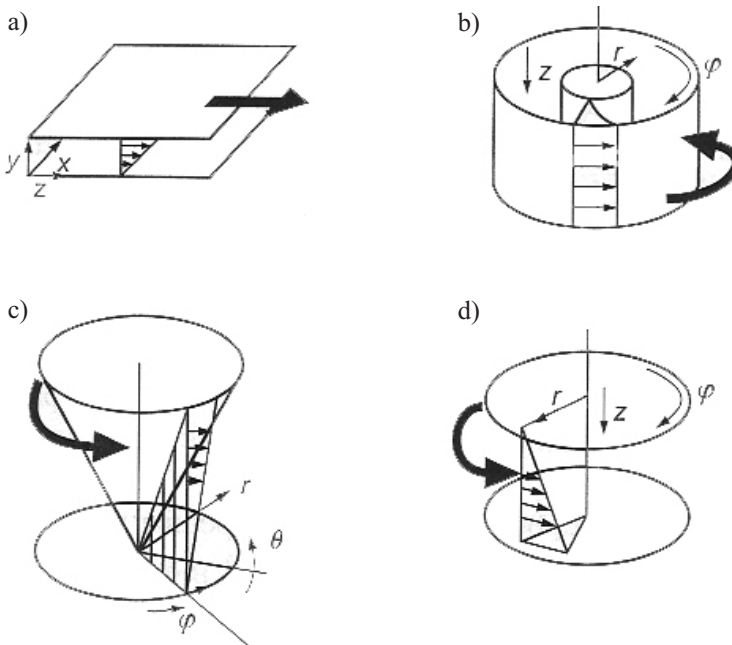
Rys. 11. Oprogramowanie RheoSolution stworzone na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH
 Źródła własne

Dzięki myśli, sprzętowi i oprogramowaniu następuje więc ciągły rozwój wiedzy dotyczącej zmieniających się w czasie właściwości rzeczywistych płynów. Obecnie reologia posiada silne wsparcie ze strony przemysłu, który definiuje nowe obszary badawcze i ocze-

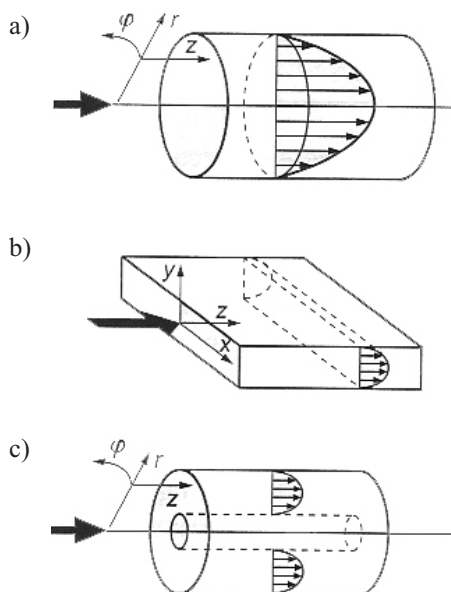
kuje na nowe rozwiązania, które można wdrożyć, upraszczając w ten sposób różnego rodzaju procesy przemysłowe. Nowe idee oraz wyniki badań z obszaru reologii prezentowane są w interdyscyplinarnych czasopismach, zajmujących się różnymi aspektami reologii. Do najbardziej znanych periodyków należą: Applied Rheology, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Journal of Rheology, Korea-Australia Rheology Journal, Rheologica Acta.

3. PRZYRZĄDY POMIAROWE STOSOWANE W WIERTNICTWIE

Nieodzownym warunkiem rozwoju metod obliczeniowych inżynierii cieczy wiertniczych jest znajomość parametrów określających właściwości cieczy w czasie przepływu, czyli tzw. parametrów reologicznych. Ze względu na duże zróżnicowanie cieczy wiertniczych opracowane zostały różne metody badań reometrycznych. Badania reometryczne są zwykle realizowane przez pomiar sił lub momentów sił (odzwierciedlających stan naprężeń w materiale) oraz pomiar przemieszczeń lub prędkości ścinania (reprezentujących odkształcenia). W trakcie badań analizuje się wleczony lub ciśnieniowy przepływ cieczy wiertniczej. Przepływem wleczonym nazywa się przepływ, zachodzący między dwiema powierzchniami, z których jedna jest ruchoma, a druga nieruchoma (rys. 12). Natomiast przepływem ciśnieniowym określa się przepływ, który zachodzi w zamkniętym kanale w wyniku różnicy ciśnienia, występującej wzdłuż tego kanału (rys. 13).



Rys. 12. Rodzaje przepływów wleczonych: a) przepływ między równoległymi płaszczyznami; b) przepływ między współosiowymi cylindrami; c) przepływ między stożkiem i płytką; d) przepływ między dwoma płytkami



Rys. 13. Rodzaje przepływów ciśnieniowych: a) przepływ w kanale cylindrycznym; b) przepływ w kanale płaskim; c) przepływ w kanale pierścieniowym

Odpowiednio do przedstawionych na rysunkach 12 i 13 schematów przepływów wiskozymetrycznych, skonstruowane zostały różne typy reometrów. Najważniejsze z nich to [6]:

- reometry rotacyjne:
 - ze współosiowymi cylindrami;
 - typu stożek- płytka;
 - typu płytka- płytka;
- reometry ciśnieniowe (wypływowe):
 - kapilarne;
 - szczelinowe.

Zasada działania reometrów rotacyjnych polega na ścinaniu badanego płynu w szczelinie między dwoma powierzchniami, z których jedna wykonuje ruch obrotowy, a druga jest nieruchoma. Szczeliny te mogą być tworzone przez dwa współosiowe walce, stożek i płytke lub dwie równoległe tarcze. Pomiar polega na określeniu związku między prędkością kątową obracającego się elementu pomiarowego a momentem skręcającym, związanym z tym obrotem. Znajomość tego związku umożliwia określenie zależności między prędkością ścinania i naprężeniem ścinającym, czyli pozwala na wyznaczenie krzywej płynięcia badanej cieczy.

Istota działania reometrów ciśnieniowych polega na przetłaczaniu badanej cieczy przez kanały (cylindryczne lub szczelinowe). Pomiar polega na określeniu zależności między objętościowym natężeniem przepływu cieczy a spadkiem ciśnienia wywołanym tarcie wewnętrzne. Znajomość tej zależności umożliwia wyznaczenie krzywej płynięcia.

Zasadnicza różnica pomiędzy reometrami rotacyjnymi a ciśnieniowymi polega na tym, że w przypadku reometrów rotacyjnych nie występuje ograniczenie czasowe pomiaru. Umożliwiają więc one wyznaczenie dynamicznych charakterystyk reologicznych. Korzystając z reometrów rotacyjnych, można też wyznaczać różnice naprężeń normalnych. Ograniczeniem tego typu reometrów jest natomiast możliwość stosowania tylko w zakresie małych szybkości ścinania. Reometry ciśnieniowe mają prostszą budowę i umożliwiają pomiar w szerokim zakresie, ale od wyższych szybkości ścinania [9].

W celu określania parametrów reologicznych cieczy wiertniczych stosuje się różne rozwiązania konstrukcyjne reometrów. Począwszy od prostych konstrukcji wypływowych (lejek Marscha), poprzez rotacyjne o współosiowych cylindrach (Fann, Chan) do układów stożek-płytki (np. Brookfield DV II Pro) czy płytki-płytki (np. RheoStress 600 firmy Haake).

Znając zależności pomiędzy szybkością ścinania a naprężeniami stycznymi, można wyznaczyć parametry reologiczne cieczy wiertniczych, stosując metodykę opisaną w pracy [7].

4. BADANIA NAD REOLOGIA PŁYNÓW WIERTNICZYCH PROWADZONE NA WWNIG

W nowoczesnych technologiach wiertniczych wykorzystuje się różnego rodzaju płyny. Zaliczyć do nich można płuczki wiertnicze, zaczyny uszczelniające, zaczyny wzmacniające, zaczyny stabilizujące, zaczyny do tworzenia mostów technologicznych, cieczki przemywające, cieczki wyprzedzające, cieczki przybitkowe, cieczki kwasujące, cieczki szczelinujące i cieczki podpierające szczeliny oraz cieczki nadpakerowe. Obszar ich aplikacji jest bardzo szeroki, a właściwości chemiczne, fizyczne oraz parametry reologiczne i technologiczne płynów zależą od celu ich stosowania, oraz są pochodną czynników geologiczno-wiertniczych. W Zakładzie Wiertnictwa i Geoinżynierii, Wydziału Wiertnictwa Nafty i Gazu AGH od wielu lat prowadzone są badania nad wykorzystaniem płynów w technologiach wiertniczych i geoinżynierskich. W ostatnich latach w badaniach tych skoncentrowano się nad optymalizacją doboru modeli reologicznych płynów oraz wpływem parametrów reologicznych na właściwości technologiczne. Zasady wyznaczania parametrów reologicznych dla podstawowych dwóch modeli płynów wiertniczych tj.: uogólnionych cieczy newtonowskich (cieczy Newtona, pseudoplastycznej i zagęszczanej ścinaniem) oraz nie-newtonowskich liniowych plastycznolepkich (cieczy binghamowskich) określa norma API 13D RP. W normie tej przewiduje się pomiar parametrów reologicznych dla ściśle określonych szybkościach ścinania z wykorzystaniem lepkościomierzy obrotowych typu Fann lub Chan. W przypadku stosowania innych modeli reologicznych, np. nieliniowych cieczy plastycznolepkich (cieczy Herschela-Bulkleya, Cassona) aplikacja zawartych w normie API 13 D RP zależności jest bezzasadna. W Zakładzie Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH opracowano zasady wyznaczania parametrów reologicznych modeli Cassona oraz Herschela-Bulkleya oraz metodykę doboru optymalnego modelu reologicznego [7, 8].

Na podstawie analizy literatury oraz doświadczeń własnych stwierdzono, że niezależnie od przyjętego modelu reologicznego, właściwości reologiczne płynu wiertniczego mogą ulegać zmianie, przy czym zakres zmian zależy od szybkości ścinania płynu czasie jego stosowania. Z praktycznego punktu widzenia niezbędne jest więc wyznaczanie para-

metrów reologicznych cieczy dla zakresu zmian szybkości ścinania odpowiadającego warunkom przepływu. Podstawy matematyczne wyznaczania wartości szybkości ścinania cieczy technologicznych przy ścianie przewodu o przekroju kołowym podali B. Rabinowitsch i M. Mooney [1, 2, 4]. Autorzy zalecają wykorzystywać wzór

$$\dot{\gamma}_w = 3 \left(\frac{8Q}{\pi D^3} \right) + \frac{D\Delta p}{4L} \frac{d \left(\frac{8Q}{\pi D^3} \right)}{d \left(\frac{D\Delta p}{4L} \right)} \quad (1)$$

A.B. Metzner i J.C. Reed [1] zaproponowali modyfikację równania (1) do postaci

$$\dot{\gamma}_w = \frac{3n' + 1}{4n'} \left(\frac{8v}{D} \right) \quad (2)$$

gdzie

$$n' = \frac{d \left(\ln \frac{D\Delta p}{4L} \right)}{d \left(\ln \frac{8v}{D} \right)} \quad (3)$$

Zakres zmian szybkości ścinania ($\dot{\gamma}$) stosowanych płynów wiertniczych stosowanych w wierceniach naftowych jest bardzo szeroki. W przestrzeni pierścieniowej pomiędzy rurami okładzinowymi a rurami płuczkowymi obserwuje się wielkości szybkości ścinania o wartościach od kilku do kilkudziesięciu s^{-1} . W przewodzie wiertniczym od kilkuset do ponad tysiąca s^{-1} , a w dyszach narzędzi wierzących parę tysięcy s^{-1} . O ile zachowanie się płynów wiertniczych w średnich prędkościach ścinania jest ogólnie znane, to przy niskich i wysokich szybkościach ścinania zachodzące w płynie zjawiska fizyczne nie są jeszcze dobrze poznane.

Dlatego też obecnie badania reologiczne koncentrują się na dwóch obszarach:

- 1) wyznaczania lepkości pozornych płynów w niskich szybkościach ścinania (*Low Shear Rate Viscosity* – LSRV),
- 2) określania lepkości pozornych płynów przy wysokich szybkościach ścinania (*High shear Rate Viscosity* – HSRV).

W wiertnictwie niskie szybkości ścinania występują w przestrzeni pierścieniowej pomiędzy nieorowaną lub orowaną ścianą otworu a kolumną przewodu wiertniczego. Wartości te obserwuje się szczególnie przy wierceniu otworów horyzontalnych, gdy przewód wiertniczy leży na dolnej części ściany otworu. Niskie szybkości ścinania są między innymi przyczyną powstawania i eskalacji wielu niekorzystnych zjawisk takich, jak: osadzanie zwiercin na dolnej części ściany otworu kierunkowego (*bad cuttings effect*) oraz wytrącanie się z płuczki wiertniczej obciążającej ją fazy stałej, np. barytu (*barite sag effect*). W wyniku nałożenia się tych procesów w otworach kierunkowych powstają stożki osadcze, które w pewnym momencie lawinowo przemieszczają się wzdłuż dolnej części ściany

otworu kierunkowego, powodując komplikacje i awarie wiertnicze. Zjawisko to nosi nazwę efektu Boycotta. Dotychczas naukowcom na świecie nie udało się jednoznacznie określić, dla poszczególnych modeli reologicznych, ilościowych zależności ograniczających opisywane zjawiska. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono jednak że zasadniczy wpływ na stopień oczyszczania otworu wiertniczego ma wielkość lepkości pozornej określonej przy niskich szybkościach ścinania (LSRV). W Zakładzie Wiertnictwa i Geoinżynierii na skonstruowanym stanowisku laboratoryjnym przeprowadza się badania sedymentacji zwiercin w przepływającej płuczce wiertniczej. Badania te zmierzają do ustalenia ilościowego wpływu wartości LSRV na zdolność płuczki do wynoszenia zwiercin oraz korelacji innych parametrów reologicznych z wartością LSRV. Lepkość pozorną przy niskich szybkościach ścinania płynów określa się reometrem M3500 firmy Grace lub DV-III Ultra firmy Brookfield, przy zastosowaniu zalecanych procedur [3].

Kolejnym obszarem badań prowadzonych w Zakładzie Wiertnictwa i Geoinżynierii WWNiG AGH są prace nad zachowaniem się płynów wiertniczych w wysokich szybkościach ścinania. W tym celu skonstruowano stanowisko laboratoryjne, umożliwiające pomiar oporów przepływu cieczy wiertniczej [9]. Stanowisko to pozwala na wyznaczenie współczynnika strat na tarcie w przepływie turbulentnym rzeczywistego płynu opisywanego dowolnym modelem reologicznym. Umożliwia również wyznaczenie wartości skorygowanego wykładnika potęgowego (n') niezbędnego przy opisie turbulentnych zachowań cieczy Ostwalde de Waelle.

5. PODSUMOWANIE

Na przestrzeni ostatnich lat nastąpił znaczny postęp w badaniach nad reologią płynów technologicznych i obecnie w każdej dziedzinie działalności ludzkiej można znaleźć praktyczne zastosowania prac badawczych.

W Zakładzie Wiertnictwa i Geoinżynierii, Wydziału Wiertnictwa Nafty i Gazu AGH od wielu lat prowadzone są badania nad wykorzystaniem płynów w technologiach wiertniczych i geoinżynierskich. W ostatnich latach w badaniach tych skoncentrowano się nad optymalizacją doboru modeli reologicznych oraz wpływem parametrów reologicznych na właściwości technologiczne płynów wiertniczych.

Obecnie przeprowadza się badania wpływu wartości LSRV na szybkość sedymentację zwiercin w przepływającej płuczce wiertniczej. Wykonywane są również prace, umożliwiające wyznaczenie współczynnika strat na tarcie w przepływie turbulentnym rzeczywistego płynu opisywanego dowolnym modelem reologicznym.

SPIS OZNACZEŃ

- D – średnica wewnętrzna rury płuczkowej [m]
- Δp – opory przepływu [Pa]
- $\dot{\gamma}_w$ – szybkość ścinania mierzona przy ścianie rury [s^{-1}]
- L – długość rury płuczkowej [m]

- n' – zmodyfikowana wartość wykładnika potęgowego [-]
 Q – strumień objętości przepływu cieczy [m^3/s]
 v – prędkość przepływu cieczy [m/s]

LITERATURA

- [1] Metzner A.B., Reed J.C.: *AiChE Journal*, 1, 434, 1955
- [2] Mooney M.: *J. Rheol.*, 2, 1931
- [3] *Procedure for measuring the viscosity of a vinyl dispersion (or other liquids) at low shear rates by the Brookfield® viscometer.* Norma The Society of the Plastics Industry, SPI/VPD Technical Committee, Washington 03/2006
- [4] Rabinowitsch B.: *Z. Physik. Chem.*, 145A, 1929
- [5] Schramm G.: *Reologia – podstawy i zastosowanie.* Poznań, Ośrodek Wydawnictw Naukowych 1998
- [6] Wilczyński K.: *Reologia w przetwórstwie tworzyw sztucznych.* Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne 2001
- [7] Wiśniowski R.: *Metodyka określania modelu reologicznego cieczy wiertniczej.* Rocznik AGH Wiertnictwo Nafta Gaz, 18, 2001
- [8] Wiśniowski R.: *Zastosowanie modelu Herschela–Bulkeleya w hydraulice płuczek wiertniczych.* Nowoczesne Techniki i Technologie Bezwykopowe, z. 2, 2000
- [9] Wiśniowski R., Stryczek S., Skrzypaszek K.: *Koncepcja stanowiska badawczego umożliwiającego pomiary przepływów cieczy wiertniczych.* Rocznik AGH Wiertnictwo Nafta Gaz, 22/1, 2005
- [10] Barnes H.A., Bell D.: *Controlled stress rotational rheometry: An historical review.* Korea Australia Rheology J., vol. 15, 2003, No. 4
- [11] Katalog firmowy Brookfield
- [12] Katalog firmowy Deer Instruments
- [13] Katalog firmowy Fann Instruments Company
- [14] Katalog firmowy Haake GmbH