

Czesław Rybicki*, Maciej Wójcikowski*, Jacek Blicharski*

**STANOWISKO LABORATORYJNE
DO BADANIA PRZEPIYWÓW WIELOFAZOWYCH
W OŚRODKACH POROWATYCH****

1. WSTĘP

Stanowisko laboratoryjne do badania przepływów wielofazowych w ośrodkach porowatych, powstało w ramach Projektu Badawczego nr 8T12A04020 finansowanego przez KBN oraz badań statutowych i własnych realizowanych w Zakładzie Gazownictwa Ziarnego Wydziału Wiertnictwa Nafty i Gazu AGH w Krakowie [1].

Stanowisko badawcze umożliwia prowadzenie badań wzajemnego wypierania dwóch płynów w układach: gaz – gaz i gaz – ciecz. Badania realizowano z użyciem trzech gazów: metanu, sztucznego powietrza, azotu, oraz wody. Powietrze używane było głównie do prowadzenia badań testowych aparatury w zakresie jej szczelności oraz pomiaru przepuszczalności ośrodka porowatego. Schemat ogólny stanowiska przedstawiono na rysunku 1.

2. OPIS STANOWISKA LABORATORYJNEGO

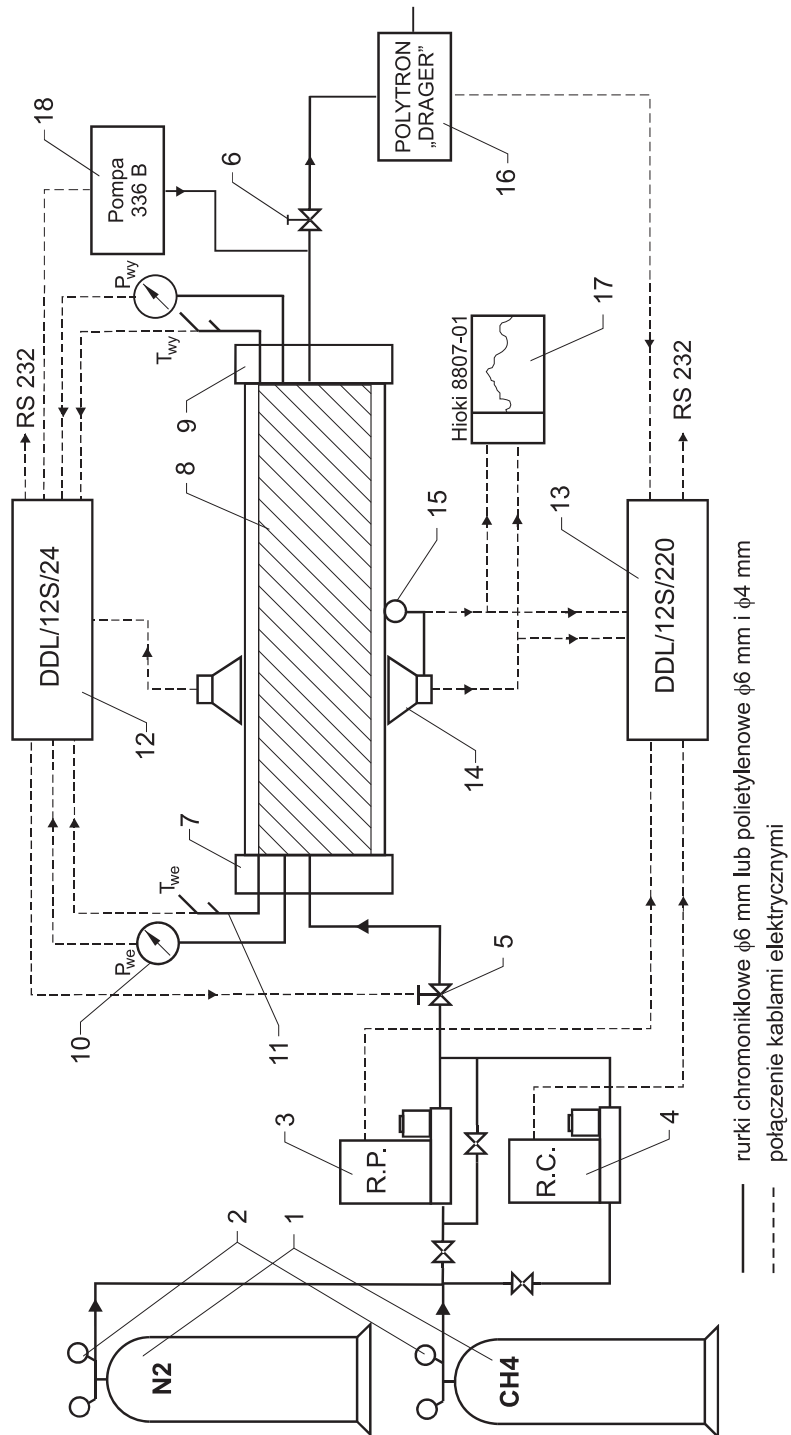
Głównym elementem stanowiska laboratoryjnego jest komora pomiarowa (8) z głowicami: wejściową (7) i wyjściową (9) z wbudowanym w niej elementem ośrodka porowatego, w którym odbywa się przepływ płynów. Obie głowice różnią się tylko wyposażeniem, dobranym stosownie do opcji pomiarowej.

Każda z głowic umożliwia zamontowanie:

- czujnika temperatury (11),
- przetwornika ciśnienia (10),
- dwóch króćców wejścia i wyjścia dla płynów badawczych wraz z elektrozaworami (5) i (6).

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

** Artykuł został przygotowany w ramach badań statutowych wykonywanych w roku 2003 i 2004



Rys. 1. Schemat ogólny stanowiska do badania przepływów dwufazowych w ośrodkach porowatych
Objaśnienia w tekście

Butle z gazami (1) wyposażone są w reduktory gazowe (2). Między butlami gazowymi a głowicą wejściową (7) komory badawczej umieszczono dwa zespoły pomiarowe oznaczone symbolami R.P. – regulator przepływu (3) i R.C. – regulator ciśnienia (4). Oba są urządzeniami wysokiej klasy wykorzystującymi czujniki typu przewodnościowego. W regulatorze przepływu ilość przepływającego gazu wynika z pomiaru rozkładu temperatur wzdłuż przewodu czujnika, przez który przepływa gaz. Na przewodzie (rurce pomiarowej) zamontowane są dwa rezystory pomiarowe, których temperaturę wymusza się przez przepływ stabilizowanej wartości prądu. Rozkład temperatury takiego układu opisywany jest w przybliżeniu funkcją

$$y(x) = A \cdot \cos^2 \pi \frac{x}{x_o},$$

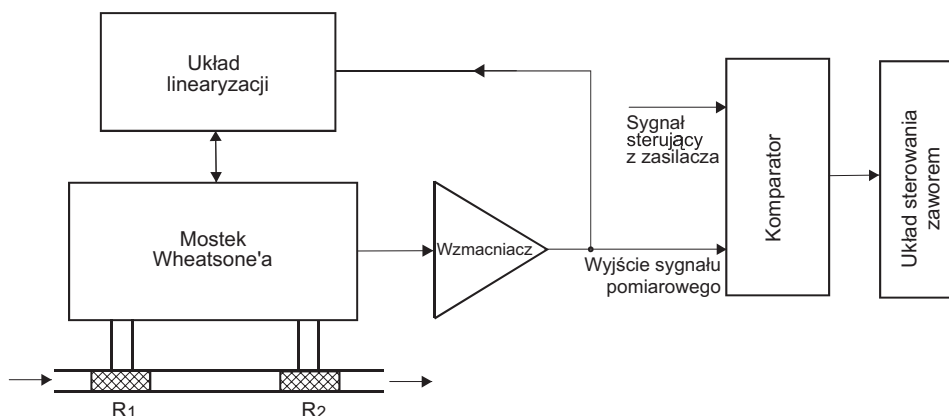
mającą charakter tzw. „krzywej dzwonowej”.

Przepływ gazu przez rurkę pomiarową powoduje zachwianie rozkładu temperatur i tym samym zachwianie równowagi mostka pomiarowego, którego jedną z gałęzi stanowią umieszczone na rurce pomiarowej rezystory. Zmiany rezystancji czujnika wykonanego z materiałów o odpowiednim współczynniku termicznym są wzmacniane w układzie pomiarowym i są sygnałem pomiarowym (0÷5 V lub 0÷10 V). Sygnał ten jest proporcjonalny do wielkości masowego natężenia przepływu gazu, a w końcu w wyniku zastosowania odpowiednich współczynników konwersji sygnał ten jest proporcjonalny do objętościowego natężenia przepływu gazu odniesionego do warunków normalnych (tj. 101 325 Pa i 293,15 K). Sterowanie zaworem regulacyjnym i w efekcie stabilizację przepływu uzyskuje się w wyniku porównania sygnału pomiarowego z sygnałem sterującym zadany w układzie komparatora. Regulacja przepływu odbywa się w sposób płynny, umożliwiający pomiar natężenia przepływu zarówno w obszarze laminarnym, jak i turbulentnym. Układ elektroniczny regulatora posiada układ sterujący zaworem o dużej stałej czasowej dobranej tak, aby regulacja była optymalna, reaguje szybko na zmiany natychmiastowe. Istnieje jednak problem występujący w chwilach załączania, polegający na pojawianiu się przeregulowań oraz dochodzeniu do wartości zadanej. Niekorzystny wpływ tego zjawiska jest kompensowany poprzez wprowadzenie tzw. miękkiego startu (ang. *soft start*), który umożliwia asymptotyczne dojście do zadanej wartości przepływu z minimalnym przeregulowaniem nie większym niż 1% zakresu pomiarowego (FS).

Dane techniczne zastosowanego regulatora przepływu typu ERG 130 2F podano poniżej:

- zakres regulacji 2÷100% FS;
- dokładność $\pm 0,5\%$ FS;
- powtarzalność $\pm 0,3\%$ FS;
- czas odpowiedzi 3 s do uzyskania zadanej wartości z dokładnością 2%;
- maksymalne ciśnienie robocze 1 MPa;
- zakres temperatury pracy 5÷35°C;
- sygnał wyjściowy 0÷5 V lub 0÷10 V;
- napięcie zasilania ± 15 V;
- pobór mocy maks. 2,5 W;
- podłączenie gazowe 1/8" NPG.

Schemat blokowy użytego w badaniach regulatora przepływu metanu przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat blokowy działania regulatora przepływu: R_1 , R_2 – opory kontrolne

W ciągu pomiarowym przepływającego gazu istnieje możliwość stabilizacji ciśnienia na wejściu do komory pomiarowej poprzez zastosowanie regulatora ciśnienia. W badaniach używano regulatora ciśnienia typu ERG 200P 2F. Działanie tego urządzenia jest oparte na tych samych czujnikach, jakie wykorzystywane są w regulatorach przepływu. Dodatkowo w tym regulatorze wykorzystano wysokiej klasy czujnik ciśnienia firmy NOVA SENSOR. Sygnał z tego czujnika jest doprowadzany do komparatora, którego zadaniem jest utrzymywanie natężenia prądu na poziomie pozwalającym utrzymać stałe zadane ciśnienie.

Dane techniczne użytego regulatora ciśnienia ERG 200 2F podano poniżej:

- zakres regulacji 2÷100% FS;
- dokładność $\pm 0,3\%$ FS;
- powtarzalność $\pm 0,3\%$ FS;
- maksymalne ciśnienie robocze 10 MPa;
- zakres temperatury pracy 0÷60°C;
- sygnał wyjściowy 0÷5 V lub 0÷10 V;
- napięcie zasilania ± 15 V;
- pobór mocy maks. 2,5 W;
- podłączenie gazowe 1/8" NPG;
- masa 0,9 kg.

Oba regulatory mogą pracować oddzielnie lub w połączeniu szeregowym. Do zastosowanych regulatorów przepływu i ciśnienia użyto uniwersalnych zasilaczy typu ERG 1 MKZb.

Sterowanie procesem dozowania gazów przez regulator na stanowisku badawczym może odbywać się:

- ręcznie, przez zmianę ustawienia 10-obrotowego potencjometru znajdującego się na płycie czołowej zasilacza;
- automatycznie, poprzez podanie napięcia sterującego.

Rejestrację wyników pomiarów uzyskiwanych w trakcie badań prowadzono z użyciem rejestratorów typu „Data Logger” wykonanych przez Zakład Doświadczalny Aparatury Naukowej i Automatyki w Krakowie (rejestratory DDL12S/24 oraz DDL12S/220) oraz cyfrowo-analogowy rejestrator typu HIOKI 8807-01.

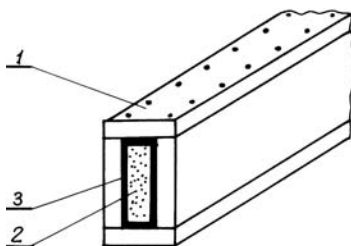
Rejestratory DDL12S/24 oraz DDL12S/220 pozwalają na zapis 4200 punktów pomiarowych. Rejestrator DDL12S/24 umożliwia cyfrowy zapis wartości sześciu mierzonych parametrów, tj.: daty, czasu, ciśnienia na wejściu i wyjściu komory, temperatury i wydajności przepływu. Rejestrator ten posiada także możliwość sterowania pompą tłoczącą. Dzięki temu możliwy jest przepływ płynu przez komorę badawczą przy założonym spadku ciśnienia Δp . Rejestrator DDL12S/220 przystosowany jest do odbioru sygnału prądowego w zakresie 4÷20 mA wysyłanego przez poszczególne przetworniki.

Dlatego oprócz zapisu daty i czasu pomiaru rejestrator ten można skonfigurować do zapisu następujących wielkości pomiarowych:

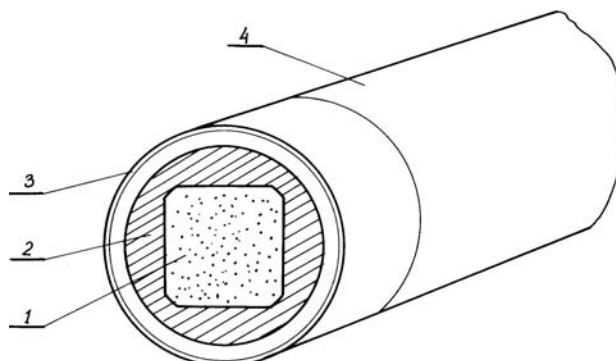
- wielkości absorpcji fali wywołanej zmianą wilgotności próbki [dB],
- drogi przebytej przez wilgotnościomierz [mm],
- natężenia przepływu gazu lub jego ciśnienia z regulatora ERG,
- zawartości metanu CH_4 w przepływającym strumieniu z miernika koncentracji.

Dodatkowym elementem stanowiska pomiarowego jest moduł elektroniczny współpracujący z regulatorem przepływu (3) oraz regulatorem ciśnienia (4) (rys. 1). Moduł ten stanowi standardowa kasetka typu U-1, w której umieszczono dwa zasilacze – sterowniki typu ERG 1 MKZb, dwa przetworniki typu U/I, zasilacz ± 15 V oraz integrator cyfrowy. Przetworniki U/I oraz zasilacz ± 15 V wykonano we własnym zakresie w Zakładzie Gazownictwa Ziarnego WVNIG AGH w Krakowie.

W prowadzonych badaniach laboratoryjnych procesów wzajemnego wypierania wody i gazu w złożu stosowane były rdzenie o różnych wymiarach i kształtach. Komory badawcze były dostosowane do kształtów rdzeni. Schematy komór z zabudowanymi rdzeniami przedstawiono na rysunkach 3 i 4. Każdy rdzeń został zabudowany indywidualnie w obudowę z tworzywa sztucznego. Jako materiału na obudowy komór badawczych użyto tworzyw Ertalon 66 lub Ertacetal C, charakteryzujących się odpowiednią wytrzymałością mechaniczną, dobrą obrabialnością oraz praktycznie zerowymi absorpcjami promieniowania mikrofalowego. Badane rdzenie wklejano do wykonanej z ww. tworzywa obudowy używając dwuskładnikowej gumy silikonowej, tzw. „Gumosilu”.



Rys. 3. Widok komory pomiarowej z rdzeniem prostokątnym: 1 – obudowa, 2 – elastyczne uszczelnienie, 3 – rdzeń



Rys. 4. Widok okrągłej komory pomiarowej z rdzeniem: 1 – rdzeń, 2 – uszczelnienie elastyczne, 3 – gwint, 4 – obudowa

3. METODYKA PROWADZONYCH POMIARÓW

3.1. Pomiary w układzie gaz – gaz

Pomiar wypierania się gazów o różnych właściwościach termodynamicznych polega w głównej mierze na zmierzeniu koncentracji gazu wypierającego na wyjściu z komory pomiarowej. Zasadniczym elementem układu pomiarowego jest analizator gazu POLYTRON wyposażony w sensor podczerwieni IR służący do mierzenia koncentracji gazu.

Sensor podczerwieni IR działa na zasadzie absorpcji promieniowania podczerwonego. Promień ze źródła światła poprzez okno przechodzi do kuwety, odbija się od sferycznego lustra, na którym jest ogniskowany, i poprzez drugie okno trafia na rozszczepiacz wiązki. Ta część promieniowania, która przechodzi przez rozszczepiacz, trafia poprzez filtr pomiarowy do detektora pomiarowego, gdzie zamieniana jest na sygnał elektryczny, który po przetworzeniu przedstawiany jest na wyświetlaczu cyfrowym miernika. Część promieniowania odbita na rozszczepiaczu przechodzi przez filtr odniesienia i jest wychwytywana w detektorze odniesienia. Jeżeli mieszanina gazów znajdująca się w kuwecie zawiera węglowodory, wówczas część promieniowania w zakresie długości fali filtru pomiarowego jest absorbowana, zaś detektor pomiarowy wysyła zmniejszony sygnał elektryczny. Sygnał detektora odniesienia się nie zmienia. Różnice powstałe wskutek zanieczyszczeń powietrza oraz zanieczyszczeń elementów pomiarowych przyrządu mają taki sam wpływ na obydwa detektory i są kompensowane.

Pomiary na omawianym stanowisku można prowadzić w różnych warunkach przepływowych, tj. przy wydajnościach w zakresie od 1 do 100 ml/min przy ciśnieniach od 1 do 10 barów.

Przed przystąpieniem do pomiaru badany ośrodek porowaty nasycony zostaje gazem wypieranym (azotem), po czym komora rdzenia zostaje zamknięta za pomocą elektrozaworów (5) i (6) (rys. 1). Następnie przez układ pomiarowy od butli z gazami do wejścia do komory rdzenia przetłaczany jest gaz wypierający (metan) mający za zadanie „wypłukanie” gazu wypieranego (azot), co ma na celu wyeliminowanie mieszania się gazów w rurkach

doprowadzających gaz do komory pomiarowej. W celu wyeliminowania mieszania się gazów w rurkach po wyjściu z komory pomiarowej zmniejszono zarówno średnice, jak i długości rurek doprowadzających gaz do analizatora gazu.

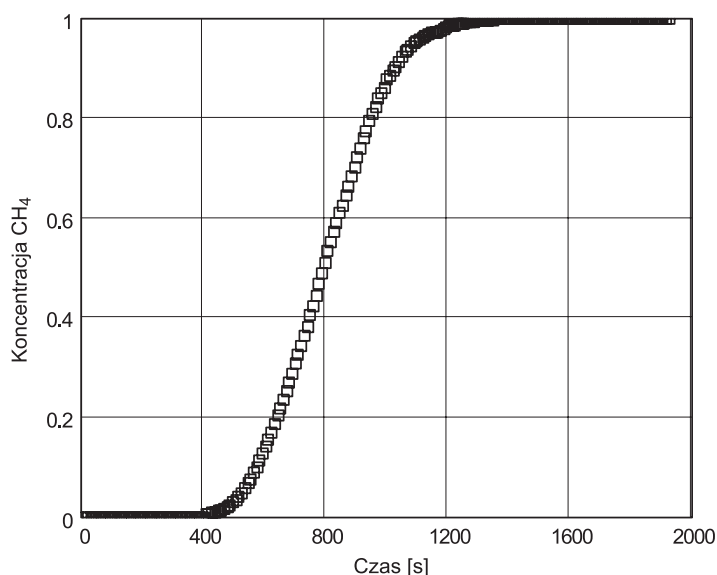
Pomiary wypierania się gazów w badanym ośrodku porowatym ze względu na odmienne własności gazów wypierającego i wypieranego mogą być realizowane przy stałej wydajności przepływu lub przy stałej różnicy ciśnień.

Pomiar przy stałej wydajności przepływu przebiega następująco (rys. 1): metan z butli ze sprężonym gazem (1) przepływa przez regulator przepływu (3), który pozwala na precyzyjne ustalenie zadanej wydajności, następnie przepływając przez komorę pomiarową z badanym ośrodkiem porowatym (8), wypiera z niego azot. Koncentracja metanu mierzona jest na wyjściu z komory pomiarowej za pomocą analizatora metanu (16).

Pomiar przy stałej różnicy ciśnień realizowany jest następująco: metan z butli ze sprężonym gazem (1) przepływa przez regulator ciśnienia (4) utrzymujący stałe ciśnienie na wejściu do komory pomiarowej, do której dozowany jest gaz, następnie przepływając przez regulator przepływu pracujący jako przepływomierz (przy nastawie na pełny przepływ), trafia do komory z badanym rdzeniem porowatym (8), z której wypiera azot. Koncentracja gazu wypierającego (metanu) mierzona jest na wyjściu z komory.

W trakcie pomiarów za pomocą przetworników ciśnienia i temperatury parametry te mierzone są na wejściu i wyjściu z komory pomiarowej. Sygnały prądowe z poszczególnych przyrządów pomiarowych zbierane są za pomocą rejestratorów DDL/12S/24 (12) i DDL/12S/220 (13) i po przeliczeniu na bezwzględną wartość wielkości fizycznej mierzonego parametru zapisywane są z żadaną częstotliwością w pamięci urządzeń.

Przykładową krzywą zmian koncentracji metanu na wyjściu z komory pomiarowej przy wypieraniu azotu metanem z wydajnością 80 ml/min przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 6. Zmiany koncentracji metanu na wyjściu z komory pomiarowej przy wypieraniu azotu metanem

3.2. Pomiary w układzie gaz – woda (rys. 1)

Gaz po przejściu przez rdzeń i po wytłoczeniu wody przechodzi przez głowicę wyjściową (9) wyposażoną w odpowiednie czujniki (przetworniki) pomiarowe (10), (11) oraz elektrozawór (6). Następnie jego ilość mierzona jest za pomocą precyzyjnego gazomierza wodnego. Jeden obrót wskazówki gazomierza odpowiada objętości 1 litra (dm^3). Najmniejsza działka pozwala na odczyt z dokładnością $\pm 10 \text{ cm}^3$ gazu. W przypadku bardzo małych przepływów gazu stosowano metodę wyporową wodną, która pozwala na odczyt objętości wypływającego gazu z większą dokładnością niż $\pm 0,1 \text{ cm}^3$.

Do wtlaczania wody do złoża zastosowano pompę – dyspenser typu 336 B (18). Jest to pompa tłokowa pozwalająca na uzyskiwanie ciśnień do 10 barów przy zmianie wydajności 1 skoku od $0,01 \text{ cm}^3$ wody do $2,5 \text{ cm}^3$. Wydajność pompy (18) może być regulowana w szerokich granicach, maksymalnie do $1,5 \text{ dm}^3/\text{min}$. Wydajność pompy można regulować poprzez nastawę długości skoku od 0,1 mm do 25 mm śrubą mikrometryczną lub częstotliwością skoku do maks. 67 skoków/min. Częstotliwość skoku pompy może być regulowana programowo za pomocą rejestratora (12), z którego dane można sczytywać przy użyciu programu komputerowego.

Pomiar wilgotności badanego rdzenia zrealizowano przy użyciu mikrofalowego wilgotnościomierza typu MMW-65-1 (14). Zasada działania wilgotnościomierza mikrofalowego opiera się na pomiarze absorpcji promieniowania mikrofalowego wyrażonego w decybelach. Ogólna zasada pomiaru polega na tym, że im wyższa zawartość wody w rdzeniu, tym absorpcja fali jest większa. W celu uzyskania odczytu w % wilgotności przyrząd wymaga wcześniejszego skalibrowania, co jest czynnością bardzo skomplikowaną. Dlatego też większość pomiarów polegała na analizie bezpośredniej wartości absorpcji wyrażonej w decybelach (dB) i miała charakter jakościowy. Autorzy mają nadzieję na uzyskanie dokładnej kalibracji w czasie dalszych prac związanych z tym tematem badań.

Wilgotnościomierz mikrofalowy (14) rejestrujący wilgotność badanego złoża jest przesuwany wzdłuż tego złoża za pomocą układu korbowo-linowego. Wartość drogi (aktualne położenie) wilgotnościomierza jest rejestrowana w sposób cyfrowy za pośrednictwem układu pomiarowego (16) firmy „PELTRON” z siedzibą w Warszawie.

Urządzenie to składa się z dwóch podzespołów:

- 1) miernika przemieszczeń liniowych MPL 101,
- 2) przetwornika przemieszczeń liniowych PLx 1000.

Układ pomiarowy drogi (15) zasilany jest napięciem zmiennym 220 V, 50 Hz. Odczyt przebytej drogi jest pokazywany na wyświetlaczu LED 3 1/2 cyfry z dokładnością $\pm 1 \text{ mm}$. Przyrząd posiada możliwość pomiaru drogi do 1000 mm, przy czym zakres pomiarowy można zmniejszać do wartości 200 mm. Sygnał pomiarowy $4 \div 20 \text{ mA}$ odpowiada mierzonej drodze $0 \div 1000 \text{ mm}$. Sygnał ten jest doprowadzany do Loggera DDL12S/220 (13) lub rejestratora cyfrowo-analogowego Hioki 8807-01 (17).

Ponieważ tok badań przewidywał wypieranie lub mieszanie się metanu z azotem w rdzeniu porowatym, na głowicy wylotowej z komory pomiarowej podłączono rejestrator POLYTRON produkcji firmy „DRAGER” (16). Zadaniem tego miernika był pomiar stężenia CH_4 w gazie opuszczającym komorę badawczą (18). Spośród najważniejszych parametrów

wspomnianego miernika wymienić należy możliwość pomiaru stężenia CH₄ w zakresie 0÷100% z dokładnością 0,01% (odczyt) lub 10 ppm. Sygnał pomiarowy 4÷20 mA również doprowadzono do rejestratora (13), sygnał ten odpowiadał zakresowi 0÷100% CH₄. Miernik ten wymaga zasilania od 13 do 30 V. Przyrząd posiada zabezpieczenia typu Cenelec, EEx em [ib] dIIB = H2T4. W celu dodatkowej rejestracji mierzonych parametrów oraz ich wizualizacji w trakcie wykonywania pomiaru stanowisko badawcze wyposażono w doskonały rejestrator analogowo-cyfrowy typu Hioki 8807-01 (17) produkcji japońskiej. Jest to przyrząd dwukanałowy umożliwiający jednoczesną rejestrację badanego przebiegu w sposób analogowy oraz w postaci cyfrowej. Rejestracja analogowa polega na tym, że badany przebieg zobrażony jest na kolorowym ciekłokrystalicznym ekranie LCD 5,7" o rozdzielczości 320×240 pikseli. Rozdzielczość wyświetlanego przebiegu – 1 działka pozioma = 20 punktów, 1 działka pionowa = 28 pkt. Cały ekran to 10 działek pionowych × 10 działek poziomych. Dodatkowo badany przebieg rejestrowany jest na papierze termicznym o szerokości 110 mm – uzyskuje doskonale odwzorowanie ekranu, z tą różnicą, że jest to obraz czarno-biały. Rejestracja cyfrowa prowadzona była z rozdzielczością 80 pkt/działkę. Zaznaczyć przy tym trzeba, że rejestrator ten umożliwia wielogodzinną rejestrację. Zastosowano zasilanie sieciowe 12 V/1 A oraz zasilanie z 6 akumulatorów NiMH 2000 mAh. Dzięki takiej konfiguracji rejestrator może pracować jako urządzenie przenośne (3 godziny pracy na świeżo naładowanych akumulatorach). Zarejestrowane wyniki pomiarów w postaci cyfrowej (80 pkt/działkę) po zakończeniu rejestracji były przesyłane do komputera PC dowolnej klasy.

Wypieranie wodą gazu i gazem wody wykonywane było przy ułożeniu pionowym i poziomym rdzenia.

Ułożenie pionowe rdzenia

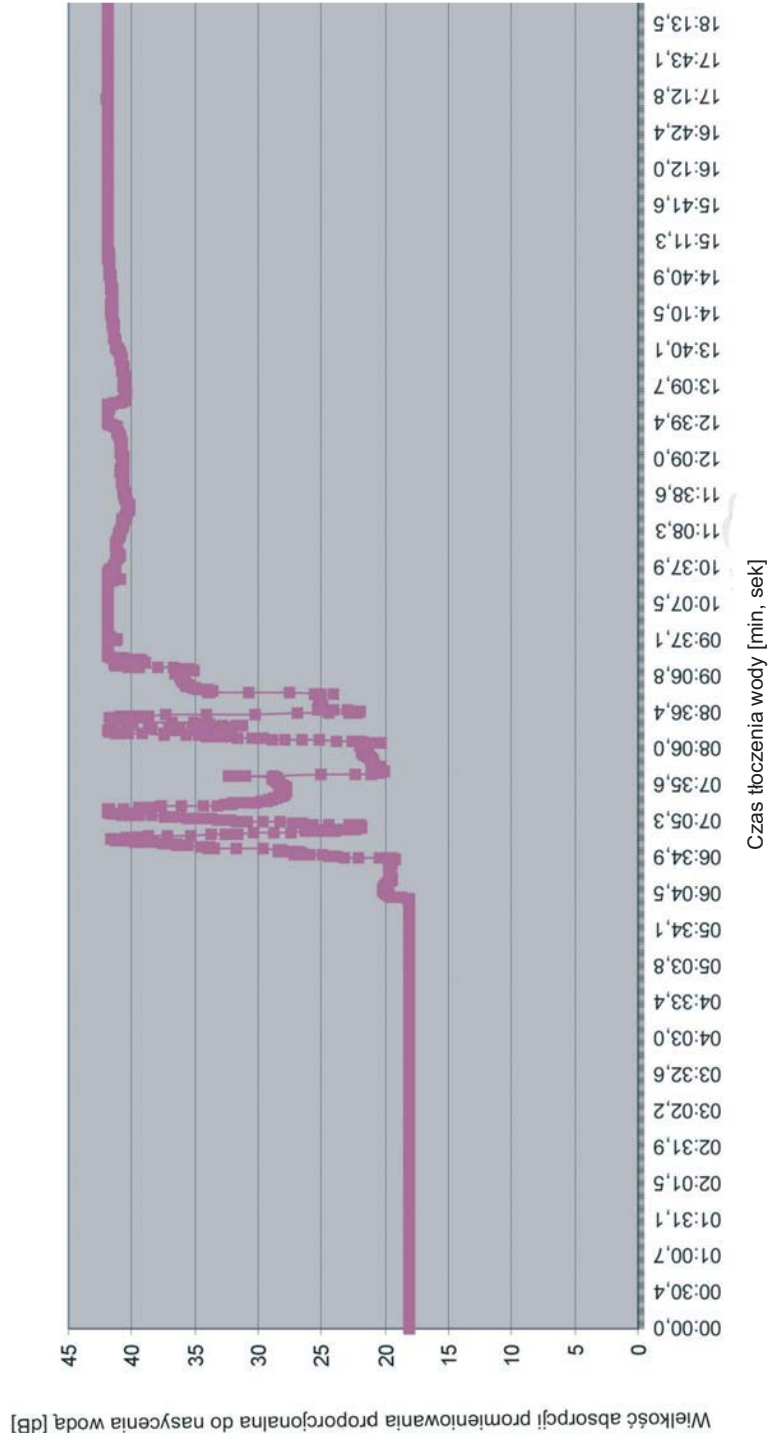
Po ustawieniu pionowym rdzenia anteny wilgotnościomierza ustawiane były w trzech położeniach.

Przebieg absorpcji fali wodą podczas tłoczenia jej do rdzenia w ułożeniu pionowym pokazano na rysunku 6. Przebieg absorpcji fali wodą dla cyklu zatłaczania gazu do rdzenia nasyconego wodą pokazano na rysunku 7.

Ułożenie poziome rdzenia

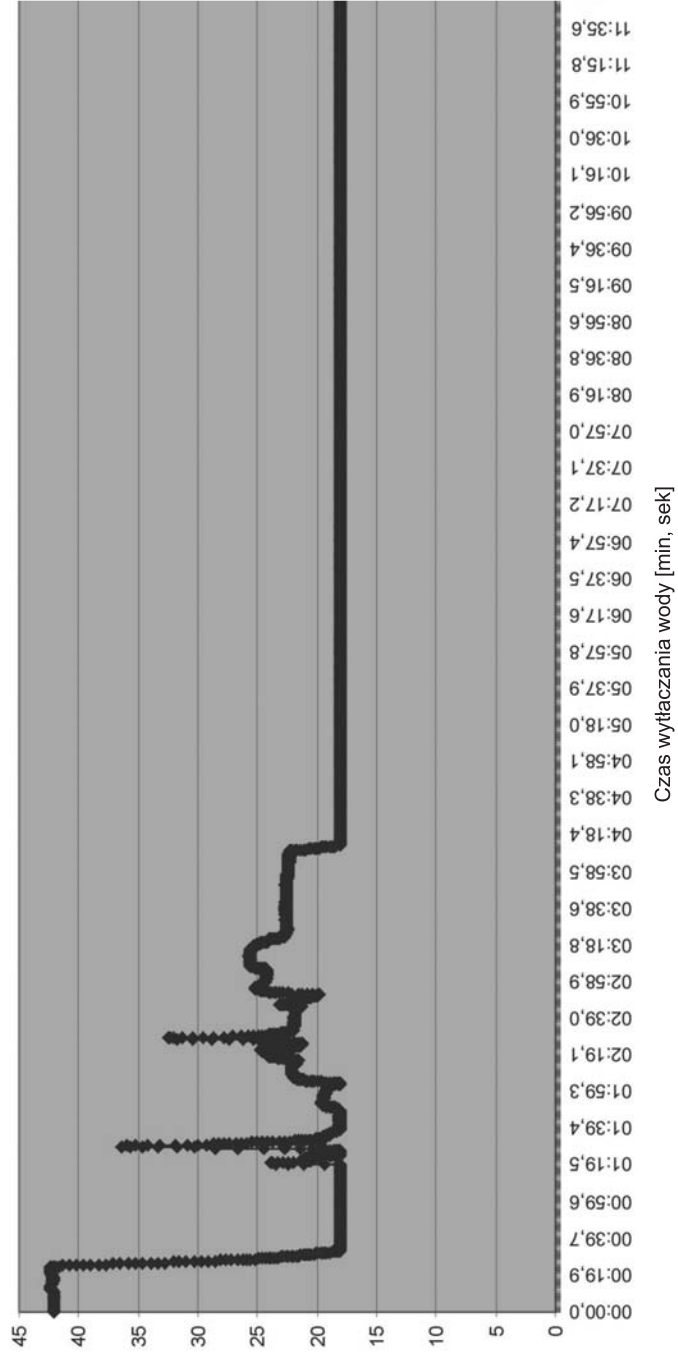
Po przeprowadzeniu badań wzajemnego wypierania woda – gaz – woda w pionowo ustawionym sztucznym rdzeniu z piasku przeprowadzono badania wypierania przy ustawieniu poziomym.

Anteny wilgotnościomierza były ustawiane w tych samych położeniach w stosunku do rdzenia co przy położeniu pionowym. Na rysunku 8 przedstawiony został przykładowy zarejestrowany przebieg zmian wielkości absorpcji fali proporcjonalny do nasycenia ośrodka wodą. Jest to wykres zbiorczy dotyczący okresu 1 godz. 6 min tłoczenia wody do sztucznego rdzenia. Dla przejrzystości na wykresie tym zaznaczone zostały przedziały czasowe, w których wykonywane były obserwacje zmian absorpcji fali w czasie tłoczenia wody. W dalszej części zostaną podane wyjaśnienia wskazań w poszczególnych przedziałach. W przedziale 1 na rysunku 8 zarejestrowano obraz zmian absorpcji fali w położeniu początkowym anten (odległość 5 cm od wlotu do rdzenia). Widać, że nastąpił gwałtowny wzrost absorpcji, co świadczy, że w tym czasie kontur wypierania woda – gaz był konturem ostrym.

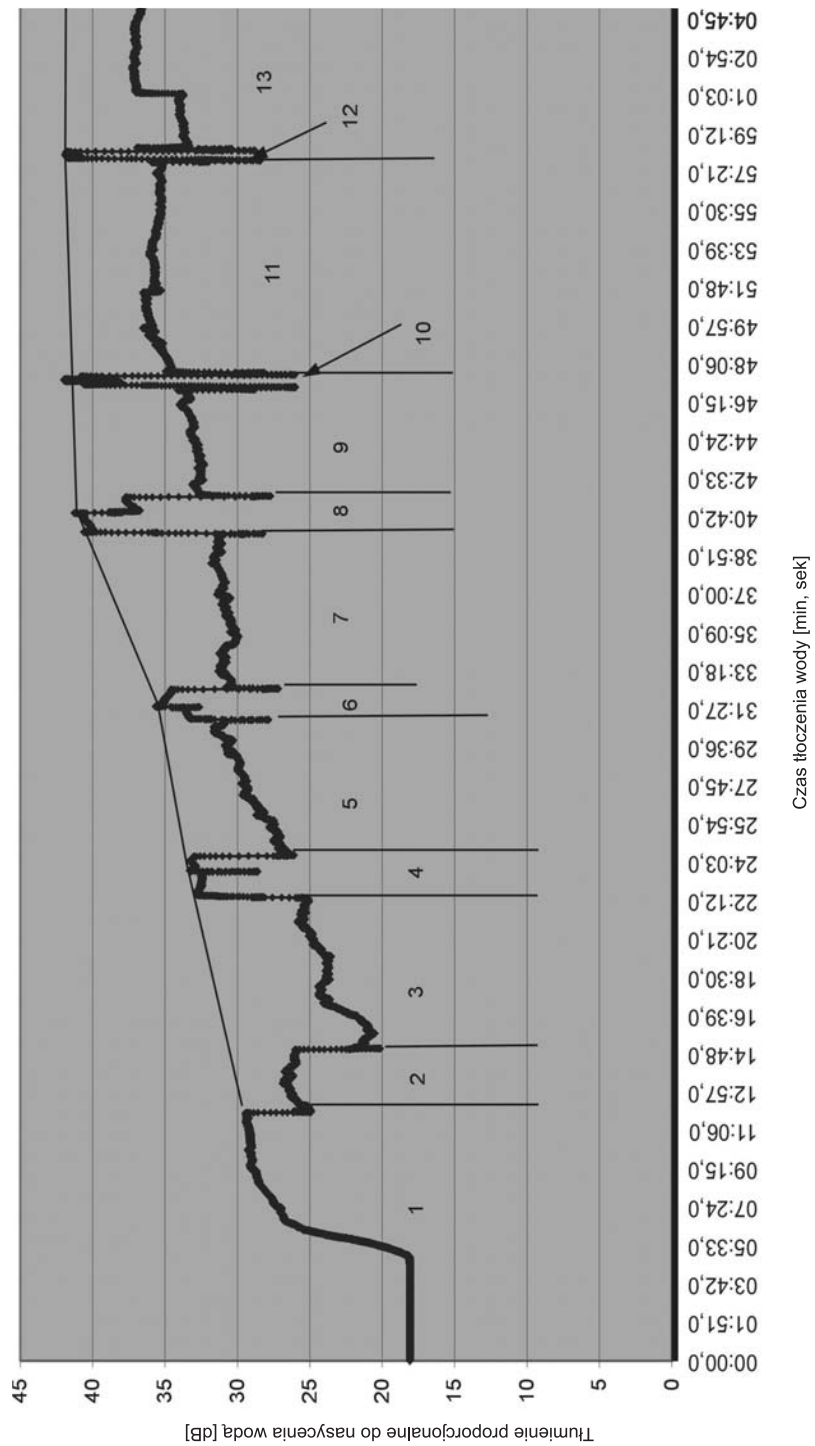


Rys. 6. Zmiana wielkości absorpcji fali (absorpcja proporcjonalna do nasycenia wodą) przy wyłaczaniu wody powietrzem przez sztuczny rdzeń w położeniu pionowym w pierwszym cyklu w czterech położeniach anten wilgotnościomierza (10, 11, 13, 15 cm od wlotu do rdzenia)

Wielkość absorpcji promieniowania proporcjonalna do nasycenia wodą [dB]



Rys. 7. Zmiana wielkości absorpcji fali w sztucznym rdzeniu w położeniu pionowym przy wylaczaniu powietrza wodą w różnych położeniach anten w funkcji czasu



Rys. 8. Zmiana wielkości absorpcji fali (absorpcja proporcjonalna do nasycenia wodą) dla sztucznego rdzenia z piasku w położeniu poziomym w funkcji czasu

Wzrost ten jednak zmniejsza się w czasie z tendencją do stabilizacji. Anteny wilgotnościomierza przesunięto do połowy długości rdzenia. Obraz zarejestrowanych zmian wielkości absorpcji w tym położeniu pokazano w przedziale 2. Widać wyraźnie, że woda przemieściła się dalej w rdzeniu. Zdaniem autorów przyczyną tego jest oddziaływanie sił grawitacyjnych. W wyniku tego woda zaczyna płynąć dolną częścią poziomo ułożonego rdzenia, nasycając stopniowo jego górne partie w wyniku działania sił kapilarnych. Po 14 min 52 s anteny przesunięto do położenia 3 (10 cm od końca rdzenia). Obraz zmian wielkości absorpcji w tym położeniu pokazuje przedział 3. Można zauważyć stopniowy wzrost nasycenia rdzenia wodą. Zarejestrowany obraz zmian wielkości absorpcji fali proporcjonalny do nasycenia wodą w przedziale 4 to obraz profilowania rdzenia od położenia 3 do położenia 1 i z powrotem. Z obrazu tego profilowania wynika, że absorpcja fali proporcjonalna do nasycenia wodą wrosła w położeniu początkowym od wartości 29 dB (przedział 1) do wartości 33 dB w położeniu 1. Obraz zmian absorpcji fali wodą zarejestrowany w przedziale 5 dotyczy ponownie położenia końcowego anten wilgotnościomierza. Przedział 6 to obraz zmian absorpcji fali z profilowania rdzenia od położenia 3 do położenia 1. Widać, że absorpcja fali proporcjonalna do nasycenia wodą wrosła do wartości 36 dB. Powtórnie anteny przesunięto do położenia 3, gdzie absorpcja fali utrzymywała się na poziomie 30÷32 dB (przedział 7). Po ok. 40 min przeprowadzono ponowne profilowanie rdzenia między położeniami 3 i 1. Należy zauważyć, że wielkość absorpcji fali wodą w położeniu 1 osiągnęła wartość maksymalną, tzn. 42 dB. Świadczyłoby to o tym, że rdzeń został w tej części swojej długości w pełni nasycony wodą. Maksymalna wielkość absorpcji fali wodą w położeniu 1 utrzymuje się w kolejnych profilowaniach (przedziały 10 i 12). Jednocześnie wielkość absorpcji fali wodą w położeniu końcowym anten stopniowo wzrasta, co świadczy o stopniowym wypełnianiu rdzenia wodą.

Jeśli poprowadzimy linię trendu po wartościach wielkości absorpcji fali dla położenia anten blisko początku rdzenia, to można zauważyć, że obie krzywe, tzn. krzywa z zarejestrowanych wielkości absorpcji fali, obecnością wody w położeniu końcowym i wykreślona krzywa trendu, asymptotycznie zbliżają się do siebie.

Wnioskiem nasuwającym się z badań wzajemnego wypierania wodą gazu i gazem wody przez sztuczny rdzeń z piasku imitujący skałę o bardzo dużej przepuszczalności jest stwierdzenie, że w przepływie wody znaczną rolę odgrywają siły grawitacyjne. Siły te w przypadku wody podścielającej obecnej w złożu lub podziemnym magazynie gazu sprzyjają występowaniu konturu ostrego przy wypieraniu gazu wodą. W przypadku wypierania wody gazem kontur gaz – woda staje się bardziej rozmyty ze względu na różnicę lepkości między wodą a gazem. W przypadku wody okalającej w złożach o dużej przepuszczalności siły grawitacyjne będą prawdopodobnie sprzyjały powstawaniu języków wodnych wzdłuż spągu złoża. Natomiast gaz włączany do złoża może wody nie usuwać całkowicie, przemieszczając się w kierunku peryferii.

2. WNIOSKI KOŃCOWE

Prowadzenie badań przepływów dwufazowych w ośrodkach porowatych wymaga utrzymania stabilnych warunków pomiaru, a także dokładnej rejestracji ich wyników.

Zaprojektowane i zbudowane stanowisko pomiarowe do badań przepływów dwufazowych spełnia założenia utrzymywania stałości parametrów pomiaru oraz dokładnej i częstej ich rejestracji.

Przeprowadzone wstępne pomiary przepływów dwufazowych zarówno z użyciem dwóch gazów, jak i wody oraz gazu zweryfikowały przydatność stanowiska do prowadzenia badań.

LITERATURA

- [1] Rybicki C., Wójcikowski M.: *Modernizacja stanowiska do badań przepływów dwufazowych*. Rocznik AGH Wiertnictwo Nafta Gaz, 17, 2000
- [2] *BetaErg – dokumentacja techniczna*. Warszawa, 2003