

Tadeusz Szpunar, Paweł Budak

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

Zastosowanie sondy areometrycznej do pomiaru przepuszczalności *in situ* za pomocą sprężonego gazu

W artykule podano sposób określania przepuszczalności *in situ* oraz *skin effect* ośrodków porowatych w otworach pionowych i poziomych przy pomocy tzw. sondy areometrycznej i sprężonego gazu. Sonda areometryczna skonstruowana została w Głównym Instytucie Górnictwa w Katowicach i aktualnie wykorzystywana jest do pomiaru szczelinowatości węgla. Wykazano możliwość wykorzystania tego urządzenia do pomiaru przepuszczalności i *skin effect*. Podano model matematyczny, który to umożliwia, oraz przeprowadzono przykładowe obliczenia dla danych zebranych w jednej z polskich kopalń węgla.

Słowa kluczowe: przepuszczalność, *skin effect*, ośrodek porowaty, test hydrodynamiczny, poziomy/pionowy odwiert drenażowy.

Evaluation of in situ permeability of porous rocks using compressed gas

The paper presents a procedure for the evaluation of in situ permeability and skin effect of porous rocks in vertical and horizontal wells, using areometric probe and pressurized gas. A mathematical model is provided, which shows that the measured values of logarithm of dimensionless pressure versus time should plot along the straight line in a vertical coordinate system. Provided are exemplary calculations of permeability and skin of coal seams in horizontal drainage wells using compressed air. The calculations were done using real world data collected from a Polish coal mine.

Key words: permeability, skin effect, porous rock, hydrodynamic test, horizontal/vertical drainage well.

Wprowadzenie

W przypadku otworów pionowych lub poziomych wierconych w warstwach produktywnych pomiędzy poszczególnymi poziomami kopalni (np. kopalni węgla lub miedzi) istnieje możliwość szybkiego określenia przepuszczalności i *skin effect* udostępnianych warstw przy użyciu gazu (powietrza lub azotu). Przepuszczalność jest bardzo ważnym parametrem warstwy porowatej, gdyż umożliwia ocenę możliwości przepływu przez nią mediów. W przypadku warstw węgla znajomość przepuszczalności pozwala na ocenę celowości odmetanowania za pomocą otworów wiertniczych wierconych z powierzchni lub ocenę zagrożenia metanowego, ewentualnie określenie celowości prac nad pozyskiwaniem metanu z węgla oraz celowości wykonywania zabiegów szczelinowania. Przedstawiona w niniejszym artykule aparatura opracowana w Głównym Instytucie Górnictwa w Katowicach, aktualnie używana do oceny szczelinowatości

górotworu, może być wykorzystana do określania przepuszczalności wszystkich warstw porowatych.

W kopalniach węgla do określania przepuszczalności w początkowej fazie po udostępnieniu pokładu, gdy nasycony jest on w 100 procentach wodą, do oceny przepuszczalności warstw udostępnionych otworami pionowymi wykorzystywana jest powszechnie znana metoda *slug testu*, która polega na spowodowaniu zaburzenia ciśnienia w złożu przez odpompowanie lub wlanie do otworu udostępniającego to złożo porcji wody i pomiarze reakcji złoża (pomiar ciśnienia na poziomie złoża w funkcji czasu). Jest to metoda zalecana przez SMRI (*Solution Mining Research Institute*) oraz wiele innych instytucji z uwagi na prostotę wykonania i niewielki koszt. Dane potrzebne do interpretacji *slug testu* można również interpretować przy użyciu metody opracowanej w INiG – PIB. Zakład Inżynierii Naftowej INiG – PIB

dysponuje autorskim programem komputerowym do interpretacji tych danych obydwoma metodami. Do określania przepuszczalności ośrodków porowatych w kopalniach podziemnych można wykorzystać praktycznie wszystkie metody interpretacji testów otworowych stosowane w przemyśle naftowym, z tym że realizacja tych testów w warunkach kopalnianych jest uciążliwa i niepraktyczna.

Autorzy opublikowali ostatnio artykuł [9], w którym zaproponowali metodę określania przepuszczalności *in situ* oraz *skin effect* w drenazowych otworach poziomych. Metoda ta polega na zatłaczaniu do takiego otworu wody ze stałym wydatkiem i pomiarze przebiegu narastania ciśnienia w otworze w funkcji czasu. W modelu założono przepływ sferyczny (trójwymiarowy) oraz jednofazowy, a zatem metoda może być wykorzystywana jedynie w fazie początkowej odgazowania, gdy warstwa jest całkowicie nasycona wodą. Metoda ta została sprawdzona jedynie na bardzo ograniczonej liczbie danych, które opublikowano w literaturze technicznej. Każda z metod określania przepuszczalności *in situ* wymagająca wykonania testów hydrodynamicznych napotyka w warunkach kopalnianych na trudności w związku ze szczupłością miejsca, przepisami górniczymi, koniecznością zainstalowania aparatury pomiarowej, potrzebą uzyskania odpowiednich pozwoleń itp.

Z drugiej strony pobieranie w kopalniach próbek skały i pomiar przepuszczalności na powierzchni w warunkach laboratoryjnych daje w efekcie wyniki niepewne, gdyż pomiary wykonywane są na próbce odprężonej (niepoddanej ciśnieniu nadkładu), której parametry mogły ulec zmianie podczas transportu w wyniku uwolnienia nagromadzonego gazu, zwłoki czasowej itp.

W niniejszym artykule podano tanią i oryginalną metodę określania przepuszczalności ośrodka porowatego w warunkach kopalnianych z wykorzystaniem urządzenia istnie-

jącego i będącego w posiadaniu GIG w Katowicach. Składa się ono ze zbiornika ciśnieniowego, sprężarki z systemem zaworów oraz sondy z dwoma pakierami uruchamianymi (pompowanymi) sprężonym powietrzem, które pozwalają na uszczelnienie wybranego odcinka otworu. Urządzenie to wykorzystywane jest aktualnie do oceny szczelinowatości węgla. Pomiary szczelinowatości polegają na szybkim podniesieniu ciśnienia w odizolowanym odcinku otworu do ciśnienia p_1 i rejestracji czasu, po którym ciśnienie to spadnie do pewnego ciśnienia p_0 . Znajomość tego czasu pozwala na określenie przy pomocy wzorów empirycznych następujących wielkości [5]:

- powierzchni spękań na poboczniczy odizolowanego odcinka [mm^2],
- wskaźnika szczelinowatości, tj. stosunku powierzchni spękań do powierzchni poboczniczy odizolowanego odcinka [%],
- sumarycznej rozwarłości szczelin [mm].

Szczegółowy opis urządzenia, sposób wykonywania pomiarów oraz interpretacji wyników, jak również przykłady interpretacji podano w literaturze [5]. Urządzenia, o którym mowa, nie wykorzystywano do obliczania przepuszczalności, ponieważ brak jest sposobu powiązania wyników pomiarów z przepuszczalnością ośrodka porowatego (brak odpowiedniego modelu matematycznego).

Niniejszy artykuł przedstawia model matematyczny pozwalający na określenie przepuszczalności ośrodka porowatego w otworze pionowym lub poziomym oraz *skin effect* związanego z wykonaniem takiego otworu. Test umożliwiający określenie przepuszczalności polega na nagłym podniesieniu ciśnienia w odizolowanym odcinku otworu do wielkości p_1 przez doprowadzenie sprężonego gazu oraz na pomiarze spadku tego ciśnienia w funkcji czasu.

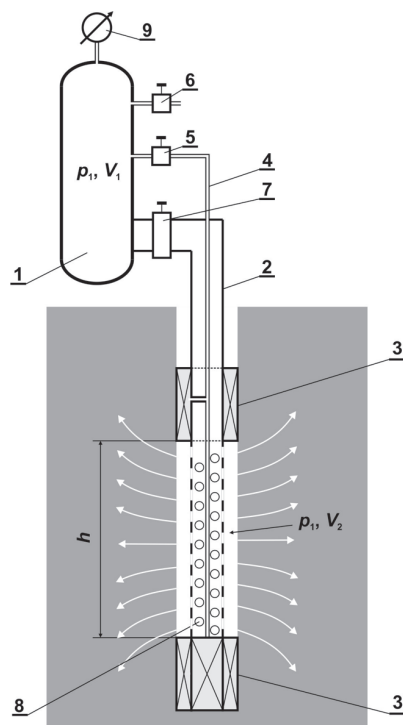
Model matematyczny

Rozpatrujemy sytuację przedstawioną poglądowo na rysunku 1. Model oparty jest na wynikach pracy [7]. Bezpośrednie wykorzystanie modelu podanego w literaturze [7, 8], skonstruowanego pierwotnie do opisu przebiegu opadania/podnoszenia lustra cieczy w otworze pionowym po wlaniu/odpompowaniu porcji cieczy, do interpretacji przebiegu spadku ciśnienia gazu w odizolowanym odcinku otworu nie jest możliwe. Model wymagał istotnych modyfikacji i dlatego zostanie przedstawiony w dalszej części artykułu w całości.

Urządzenie pomiarowe składa się ze zbiornika ciśnieniowego (1) o pojemności V_1 oraz sondy właściwej (2) w postaci rury, na której zainstalowane są pakery uszczelniające (3) uruchamiane ciśnieniem gazu ze zbiornika (1), doprowadza-

nego osobnymi przewodami ciśnieniowymi (4), przez otwarcie zaworu (5) [5]. Odcinek sondy pomiędzy pakierami jest perforowany w celu umożliwienia wnikania gazu do ośrodka porowatego. Po wprowadzeniu sondy do otworu, zapięciu pakierów i zamknięciu zaworu (5) ciśnienie gazu w zbiorniku (1) obniża się przez krótkotrwałe otwarcie zaworu upustowego (6) do ciśnienia p_1 , a następnie przez otwarcie zaworu głównego (7) na zbiorniku ciśnieniowym (1) gaz pod tym ciśnieniem podawany jest do odizolowanego przez pakery odcinka otworu o długości h , skąd przez otwory perforacyjne (8) wpływa do ośrodka porowatego. Ciśnienie w zbiorniku mierzone jest za pomocą manometru z rejestracją (9).

Otwarcie zaworu (7) na zbiorniku ciśnieniowym (1) powoduje nagły wzrost ciśnienia w izolowanym odcinku otworu



Rys. 1. Poglądowy schemat urządzenia do wykonania testu

do poziomu p_1 , które następnie obniża się w wyniku wnika-
nia gazu do ośrodka porowatego aż do pierwotnego ciśnie-
nia złożowego p_0 , co teoretycznie następuje po czasie nie-
skończenie długim. Zakładamy radialny charakter przepły-
wu gazu w złożu. Przyjmujemy, że szybkość zmiany ciśnie-
nia jest proporcjonalna do różnicy pomiędzy aktualną wiel-
kością ciśnienia a ciśnieniem p_0 , do którego dąży ciśnienie
 $p(r, t)$ dla $t \rightarrow \infty$, czyli:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -E [p(r, t) - p_0]; E > 0 \quad (1)$$

skąd mamy:

$$p(r, t) = p_0 + C_1 e^{-Et} \quad (2)$$

gdzie C_1 nie zależy od t .

Zakładamy ponadto, że ciśnienie złożowe spełnia równanie typu dyfuzji

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\phi \mu c}{k} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (3)$$

czyli $C_1(r)$ spełnia równanie:

$$C_1''(r) + \frac{1}{r} C_1'(r) + \frac{\phi \mu c}{k} E C_1(r) = 0 \quad (4)$$

Skąd:

$$C_1(r) = a_1 J_0 \left(r \sqrt{\frac{\phi \mu c E}{k}} \right) + a_2 Y_0 \left(r \sqrt{\frac{\phi \mu c E}{k}} \right) \quad (5)$$

gdzie:

a_1, a_2 – stałe,

$J_0 \left(r \sqrt{\frac{\phi \mu c E}{k}} \right), Y_0 \left(r \sqrt{\frac{\phi \mu c E}{k}} \right)$ – funkcje Bessela pierwszego i dru-
giego rodzaju, rzędu zerowego,

r – promień otworu,

ϕ – porowatość skały,

μ – lepkość,

c – ściśliwość skały,

k – przepuszczalność.

Dla spotykanych w praktyce wielkości r_0, ϕ, μ, c, k
wyrażenie $r_0 \sqrt{\frac{\phi \mu c E}{k}}$ jest bardzo małe, a dla małych wartości
argumentu w wyrażeniu (5) funkcja Y_0 ma znaczenie domi-
nujące (zauważmy, że $J_0(0) = 1$), a zatem przyjmujemy w (5)
 $a_1 = 0$ i podstawiając (5) do (2) otrzymamy:

$$p(r, t) = p_0 + a_2 Y_0 \left(r \sqrt{\frac{\phi \mu c E}{k}} \right) e^{-Et} \quad (6)$$

Stałą a_2 można wyznaczyć z warunku, że w chwili po-
czątkowej dla $t = 0$ ciśnienie na ścianie otworu dla $r = r_0$ rów-
ne jest p_1 , a zatem:

$$a_2 = \frac{p_1 - p_0}{Y_0 \left(r_0 \sqrt{\frac{\phi \mu c E}{k}} \right)} \quad (7)$$

i równanie (6) będzie miało postać:

$$p(r, t) = p_0 + \frac{p_1 - p_0}{Y_0 \left(r_0 \sqrt{\frac{\phi \mu c E}{k}} \right)} Y_0 \left(r \sqrt{\frac{\phi \mu c E}{k}} \right) e^{-Et} \quad (8)$$

Dla małych wartości $r \sqrt{\frac{\phi \mu c E}{k}}$ funkcję $Y_0 \left(r \sqrt{\frac{\phi \mu c E}{k}} \right)$ można

aprosymować wyrażeniem:

$$Y_0 \left(r \sqrt{\frac{\phi \mu c E}{k}} \right) = -\frac{2}{\pi} \ln \left(\frac{r}{2} \sqrt{\frac{\phi \mu c E}{k}} \right) \quad (9)$$

Podstawiając zależność (9) do równania (8), otrzymamy:

$$p(r, t) = p_0 + \frac{p_1 - p_0}{\ln \left(\frac{r_0}{2} \sqrt{\frac{\phi \mu c E}{k}} \right)} \ln \left(\frac{r}{2} \sqrt{\frac{\phi \mu c E}{k}} \right) e^{-Et} \quad (10)$$

Ponieważ prawo Darcy'ego funkcjonuje w całym ośrod-
ku porowatym, zatem na ścianie otworu dla $r = r_0$:

$$v(r_0, t) = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p(r, t)}{\partial r} \quad (11)$$

a różniczkując (10) i podstawiając do (11), otrzymamy dla $r = r_0$:

$$v(r_0, t) = -\frac{k}{\mu} \frac{p_1 - p_0}{\ln\left(\frac{r_0}{2\sqrt{\frac{\phi\mu c E}{k}}}\right)} \frac{1}{r_0} e^{-Et} \quad (12)$$

Z drugiej strony dla sytuacji pokazanej na rysunku 1 możemy sformułować następujący bilans masy gazu: masa gazu, której ubyło w układzie: zbiornik ciśnieniowy + odizolowany pakerami odcinek otworu w wyniku spadku ciśnienia o wielkość $dp =$ masie gazu, która wypłynęła w czasie dt przez pobocznicę izolowanego odcinka otworu do osrodka porowatego:

$$(V_1 + V_2) \frac{d\rho_g}{dp} dp = 2\pi r_0 h \rho_g v(r_0, t) dt \quad (13)$$

gdzie:

$\rho_g = \frac{mp}{RT}$ – gęstość gazu,

m – masa molowa gazu,

p – ciśnienie,

V_1 – pojemność zbiornika gazu,

V_2 – pojemność izolowanego odcinka otworu,

R – stała gazowa,

T – temperatura.

Otrzymamy z (13):

$$(V_1 + V_2) \frac{dp}{p} = -\frac{k}{\mu} 2\pi h \frac{(p_1 - p_0) e^{-Et}}{\ln\left(\frac{r_0}{2\sqrt{\frac{\phi\mu c E}{k}}}\right)} dt \quad (14)$$

Zgodnie z założeniami mamy:

dla $t = 0$ $p(r_0, 0) = p_1$

dla $t \rightarrow \infty$ $p(r_0, \infty) = p_0$

a zatem:

$$(V_1 + V_2) \int_{p_0}^{p_1} \frac{dp}{p} = -\frac{k}{\mu} 2\pi h \frac{(p_1 - p_0)}{\ln\left(\frac{r_0}{2\sqrt{\frac{\phi\mu c E}{k}}}\right)} \int_0^{\infty} e^{-Et} dt \quad (15)$$

Otrzymamy z równania (15) po przekształceniach:

$$\ln\left(\frac{r_0}{2\sqrt{\frac{\phi\mu c E}{k}}}\right) = -\frac{2\pi kh(p_1 - p_0)}{\mu E(V_1 + V_2) \ln\frac{p_1}{p_0}} \quad (16)$$

Wyrażenie (16) można zapisać w postaci:

$$e^{-u} = \sqrt{\frac{a}{u}} \quad (17)$$

gdzie:

$$a = \frac{V_2 \phi c (p_1 - p_0)}{2(V_1 + V_2) \ln\frac{p_1}{p_0}} \quad (18)$$

$$u = \frac{2\pi kh(p_1 - p_0)}{\mu E(V_1 + V_2) \ln\frac{p_1}{p_0}} = \frac{a}{\frac{r_0}{2\sqrt{\frac{\phi\mu c E}{k}}}} \quad (19)$$

Wyrażenie (17) można zapisać w postaci:

$$ue^{-2u} = a \quad (20)$$

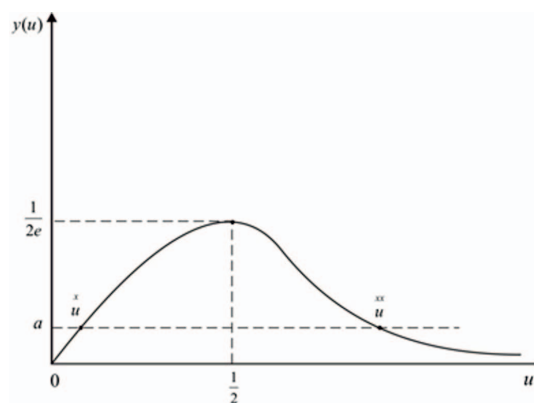
Krzywa $y = ue^{-2u}$ osiąga ekstremum w punkcie $u = \frac{1}{2}$ gdyż:

$$\left(\frac{dy}{du}\right)_{u=\frac{1}{2}} = e^{-2u}(1-2u) = 0 \quad (21)$$

oraz:

$$y\left(u = \frac{1}{2}\right) = \frac{1}{2e} \quad (22)$$

Poglądowy wykres funkcji $y(u)$ pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Poglądowy wykres funkcji $y(u)$

Jak widać na rysunku 2:

- dla $a > \frac{1}{2e}$ równanie (20) nie ma pierwiastków,
- dla $a = \frac{1}{2e}$ równanie (20) ma jeden pierwiastek $u = \frac{1}{2}$,
- dla $a < \frac{1}{2e}$ równanie (20) ma dwa pierwiastki,

przy czym dla $a < \frac{1}{2e}$ pierwszy pierwiastek u^* równania (20) leży w przedziale $(0, 1/2)$.

W zakresie wielkości spotykanych w praktyce a jest bardzo małe, a zatem równanie (20) ma dwa pierwiastki, przy czym pierwszy z nich u^* z przedziału $(0, 1/2)$ należy odrzucić, gdyż

określana na podstawie (19) wartość wyrażenia $\frac{r_0}{2\sqrt{\frac{\phi\mu c E}{k}}}$

jest zbyt duża, aby uzasadniona była aproksymacja (9).

Drugi z pierwiastków u^* obliczany jest metodą iteracyjną w sposób pokazany w rozdziale poświęconym przykładom praktycznym. Znając u^* , otrzymamy z (19):

$$E = \frac{2\pi kh(p_1 - p_0)}{\mu(V_1 + V_2) \ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right) u} \frac{1}{**} \quad (23)$$

oraz jak wynika z (10):

$$\ln \frac{p(r_0, t) - p_0}{p_1 - p_0} = \ln p_D = - \frac{2\pi kh(p_1 - p_0)t}{\mu(V_1 + V_2) \ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right) u} \frac{1}{**} \quad (24)$$

gdzie p_D – ciśnienie bezwymiarowe.

Z równania (24) wynika, że zaznaczając w prostokątnym układzie współrzędnych punkty pomiarowe $\ln p_D$, t układają się one powinny wzdłuż linii prostej o nachyleniu E , skąd możemy obliczyć przepuszczalność k .

Proces wiercenia powoduje powstanie wokół otworu strefy o przepuszczalności zmienionej względem reszty ośrodka porowatego. W strefie tej przepuszczalność może być wielokrotnie wyższa w wyniku powstania sieci szczelin lub niższa od przepuszczalności reszty złoża w wyniku oddziaływania płuczki, przytykania systemu porów przez cząsteczki fazy stałej itp. Jeżeli przebieg spadku ciśnienia po doprowadzeniu do otworu sprężonego gazu różni się od wielkości przewidzianej przez model, to fakt ten przypisujemy istnieniu wokół otworu strefy o przepuszczalności odmiennej od przepuszczalności reszty złoża. W inżynierii złożowej zjawisko to nosi nazwę *skin effect*. Obowiązują w tym przypadku zależności:

$$p_{teoret} = p_{pomierz} + \Delta p_{skin} \quad (25)$$

oraz:

$$\Delta p_{skin} \stackrel{def}{=} \frac{Q\mu S}{2\pi kh} \quad (26)$$

Przykłady praktyczne zastosowania opracowanej metody

Z punktu widzenia możliwości eksploatacji mediów z ośrodków porowatych przepuszczalność jest parametrem podstawowym. W przypadku kopalń węgla znajomość przepuszczalności węgla pozwala oszacować objętości metanu, które można pozyskać metodami otworowymi, ocenić efekty ewentualnej stymulacji lub oszacować objętość metanu wydzielającego się z udostępnionych ścianami pokładów węgla na dole kopalni i – w powiązaniu z innymi czynnikami – stopień zagrożenia metanowego.

Innym zagrożeniem w kopalniach miedzi jest występowanie w górotworze pustek wypełnionych gazem pod wysokim ciśnieniem, które są przyczyną tzw. wyrzutów masy skalnej w przypadku prowadzenia prac w pobliżu takich miejsc, co wiąże się z zagrożeniem dla ludzi. Oczywiście jest, że wysokie ciśnienie gazu, które stwierdza się w takiej pustce wymaga występowania wokół niej skał o krańcowo niskiej prze-

Uwzględniając, że $Q = 2\pi r_0 h v(r_0, t)$ oraz zależności (12), (19), (23) i (24) w (26) otrzymamy, biorąc pod uwagę (25):

$$\ln p_D = \ln \frac{p(r_0, t) - p_0}{p_1 - p_0} = - \frac{2\pi kh(p_1 - p_0)t}{\mu(V_1 + V_2) \ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right) u} \frac{1}{**} + \ln\left(1 + \frac{S}{u}\right) \quad (27)$$

lub w jednostkach stosowanych w inżynierii złożowej:

$$\log p_D = -1,2 \cdot 10^{-6} \frac{k[\text{mD}]h[\text{m}](p_1 - p_0)[\text{MPa}]t[\text{s}]}{\mu[\text{cP}](V_1 + V_2)[\text{m}^3] \log\left(\frac{p_1}{p_0}\right) u} \frac{1}{**} + \log\left(1 + \frac{S}{u}\right) \quad (28)$$

W publikacji [8] wskazano na podstawie licznych przykładów przemysłowych, że na wykresie zależności $\log p_D$ vs. t wyróżnić można dwa odcinki prostoliniowe przedzielone krzywą odpowiadającą okresowi przejściowemu, przy czym pierwszy odcinek prostoliniowy dla krótkich czasów reprezentuje przepuszczalność strefy przyodwiertowej, natomiast drugi przepuszczalność dalej zalegających partii złoża. Uzasadnienie takiego zachowania funkcji $\log p_D$ vs. t znaleźć można w literaturze [3, 6, 8]. Przedstawiony w artykule [8] model umożliwia określenie:

- przepuszczalności strefy przyodwiertowej,
 - przepuszczalności dalej zalegających partii złoża,
 - wielkości *skin effect*,
 - głębokości uszkodzenia/poprawy przepuszczalności wokół otworu,
- co zademonstrowano na przykładach przemysłowych.

puszczalności (praktycznie zerowej). Wydaje się, że odcinkowy pomiar przepuszczalności w rozpoznawczych otworach wyprzedzających i stwierdzenie narastającego spadku przepuszczalności w kolejnych odcinkach pomiarowych może być czynnikiem predykcijnym występowania takich pustek.

W publikacji [5] podano szereg przykładów pomiarów wykonanych sondą areometryczną. Badania przeprowadzono w otworach o średnicy 43 mm odcinkami o długości 0,25 m. Po napełnieniu zbiornika ciśnieniowego sprężonym powietrzem o ciśnieniu 0,45 MPa wprowadzono sondę do otworu, regulując położenie zestawu pakerów za pomocą szeregu połączonych ze sobą żerdzi sondy. Po zapięciu pakerów przez doprowadzenie do nich ciśnienia 0,45 MPa obniżono ciśnienie w zbiorniku do 0,40 MPa i doprowadzono powietrze o tym ciśnieniu do izolowanego odcinka otworu. Jak podano w pierwszej części artykułu pomierzony czas spadku

ciśnienia w zbiorniku od 0,4 do 0,25 MPa posłużył, na podstawie odpowiednich wzorów empirycznych, do obliczenia:

- sumarycznej powierzchni szczelin na pobocznicy odizolowanego odcinka [mm²],
- wskaźnika szczelinowości, tj. stosunku powierzchni szczelin do pola powierzchni pobocznicy odizolowanego odcinka pomiarowego [%],
- sumarycznej rozwarłości szczelin [mm].

Przeprowadzone badania nie pozwoliły na określenie przepuszczalności węgla, ponieważ brak jest zależności wiążącej pomierzony czas spadku ciśnienia w zbiorniku – który w sposób oczywisty zależy od przepuszczalności – z tą wielkością. Wydaje się, że przedstawiona w artykule metoda może wypełnić tę lukę. Z wyprowadzonego równania (24) wynika, że punkty pomiarowe o współrzędnych $\ln p_D, t$ układają się wzdłuż linii prostej, której nachylenie pozwala na obliczenie przepuszczalności. W literaturze [8, 9] wykazano, że nachylenie prostej zależności $\ln p_D$ vs. t po pewnym czasie zmienia się, przy czym jego wielkość dla krótkich czasów zależna jest od przepuszczalności strefy wokół odwiertu (która może być inna od przepuszczalności dalszych partii ośrodka), natomiast dla długich czasów pomiaru nachylenie zależy od przepuszczalności partii złoża zalegających dalej od otworu. Zmiany nachylenia przedzielone są krzywą reprezentującą okres przejściowy. Podane w publikacji [5] dane pomiarowe nie pozwalają na dokładne określenie przepuszczalności, ponieważ nie przeprowadzono pełnej rejestracji zmian ciśnienia w zbiorniku w zależności od czasu, a wykonano jedynie pomiar punktowy czasu, po jakim ciśnienie spadnie od 0,4 do 0,25 MPa. Można jednak podać na podstawie pomierzonego czasu przybliżoną wartość przepuszczalności, zakładając, że punkty pomiarowe leżą na prostej zależności $\ln(p(r_0, t) - p_0)/(p_1 - p_0)$ vs. t . Obliczona przepuszczalność dotyczy jedynie strefy w bezpośredniej bliskości otworu, z uwagi na bardzo krótkie czasy spadku ciśnienia do założonej wielkości (od kilku do kilkudziesięciu sekund). W przypadku węgla pomiary należy wykonywać w późniejszym stadium eksploatacji po odprowadzeniu wody, gdy ośrodek nasycony jest gazem, gdyż model zakłada przepływ jednofazowy. Pomijając oddziaływanie *skin effect* równania (24)

i (30) w układzie jednostek stosowanych w inżynierii złożowej mają postać:

$$\log p_D = -1,2 \cdot 10^{-6} \frac{k[\text{mD}]h[\text{m}](p_1 - p_0)[\text{MPa}]t[\text{s}]}{\mu_g[\text{cP}](V_1 + V_2)[\text{m}^3]} \log \frac{p_{1\text{abs}}}{p_{0\text{abs}}} \frac{1}{u} \quad (29)$$

$$a = 0,217 \frac{V_2[\text{m}^3]\phi c[1/\text{MPa}](p_1 - p_0)[\text{MPa}]}{(V_1 + V_2)[\text{m}^3] \log \frac{p_{1\text{abs}}}{p_{0\text{abs}}}} \quad (30)$$

Według danych pomiarowych podanych dla otworów 1 i 2 [5] wartości poszczególnych wielkości wynoszą: $r_0 = 0,0215$ m, $h = 0,25$ m, $V_1 = 0,05$ m³, $V_2 = \pi r_0^2 h = 3,6 \cdot 10^{-4}$ m³, $\phi = 0,02$, $p_{1\text{abs}} = 0,5$ MPa, $p_{0\text{abs}} = 0,1$ MPa (ciśnienia absolutne), $\mu_g = 0,018$ cP, $c = 3 \cdot 10^{-2}$ [1/MPa]. W tabelicach 1 i 2 podano czasy spadku ciśnienia od 0,40 MPa do 0,25 MPa dla poszczególnych interwałów otworu oraz odpowiadające tym czasom przepuszczalności obliczone przy pomocy przedstawionego modelu. Aby obliczyć pierwiastek równania (20), zastosowano prostą procedurę iteracyjną. W tym celu należy obliczyć wielkość a dla konkretnego przypadku na podstawie wzoru (30). Po podstawieniu podanych danych otrzymamy:

$$a = 5,0 \cdot 10^{-7} < \frac{1}{2e}$$

Obliczając iteracyjnie u^{**} w sposób podany w literaturze [7], już po pięciu iteracjach otrzymamy z (20):

$$u^{**} = 8,313$$

Znając u^{**} , możemy z wzoru (29) obliczyć przepuszczalność strefy w bezpośrednim sąsiedztwie otworu na podstawie czasu spadku ciśnienia od 0,40 do 0,25 MPa. Podstawiając podane w publikacji [5] wartości, otrzymamy z (29) następującą zależność:

$$k = \frac{896}{t[\text{s}]} [\text{mD}]$$

uzyskując w ten sposób tablice 1 i 2 dla dwóch z czterech przebadanych otworów [5].

Tablica 1. Otwór nr 1

Głębokość otworu	Powierzchnia szczelin na pobocznicy odizolowanego odcinka [5]	Czas spadku ciśnienia od 0,40 do 0,25 MPa [5]	Odpowiadająca podanemu czasowi przepuszczalność strefy przyotworowej
[m]	[mm ²]	[s]	[mD]
1,00	1,91	30,56	29,32
1,25	1,81	32,13	27,89
1,50	1,87	31,07	28,84

cd. Tablicy 1.

Głębokość otworu	Powierzchnia szczelin na poboczniczy odizolowanego odcinka [5]	Czas spadku ciśnienia od 0,40 do 0,25 MPa [5]	Odpowiadająca podanemu czasowi przepuszczalność strefy przyotworowej
[m]	[mm ²]	[s]	[mD]
1,75	2,05	28,50	31,44
2,00	4,26	14,44	62,05
2,25	4,60	13,49	66,42
2,50	5,02	12,47	71,85
2,75	2,30	25,53	35,10
3,00	2,94	20,28	44,18
3,25	2,95	20,22	44,31
3,50	2,11	27,79	32,24
3,75	1,95	29,87	30,00
4,00	2,01	29,06	30,83
4,25	1,92	30,31	29,56
4,50	1,99	29,31	30,57

Tablica 2. Otwór nr 2

Głębokość otworu	Powierzchnia szczelin na poboczniczy odizolowanego odcinka [5]	Czas spadku ciśnienia od 0,40 do 0,25 MPa [5]	Odpowiadająca podanemu czasowi przepuszczalność strefy przyotworowej
[m]	[mm ²]	[s]	[mD]
1,00	9,83	7,05	127,09
1,25	9,71	7,12	125,84
1,50	9,24	7,41	120,92
1,75	9,15	7,47	119,95
2,00	3,87	15,75	56,89
2,25	1,85	31,53	28,42
2,50	1,95	29,91	29,96
2,75	1,86	31,35	28,58
3,00	1,85	31,50	28,44

Obliczone przepuszczalności dotyczą górotworu w bezpośrednim sąsiedztwie otworu w promieniu kilku lub kilkunastu cm od osi otworu, gdzie występuje gęsta sieć szczelin powstała podczas wiercenia. Widoczny jest wyraźny zwią-

zek między powierzchnią szczelin na poboczniczy odizolowanego odcinka [5] a przepuszczalnością. W obliczeniach przyjęto pojemność zbiornika ciśnieniowego równą 50 litrów ($V_1 = 0,05 \text{ m}^3$).

Uwagi końcowe

1. Przedstawiony model matematyczny pozwala na określenie przepuszczalności *in situ* ośrodka porowatego przez doprowadzenie do odizolowanego odcinka otworu gazu pod ciśnieniem p_1 i naniesienie w prostokątnym układzie współrzędnych punktów pomiarowych $\log p_D$ od t . Przebieg punktów – jak wynika z modelu – należy aproksymować linią prostą, z której nachylenia obliczana jest przepuszczalność strefy przyodwiertowej dla krótkich
2. Możliwe jest określenie przybliżonej wielkości przepuszczalności na podstawie pojedynczego pomiaru ciśnienia w otworze oraz odpowiadającego mu czasu, tak jak to po-

czasów oraz przepuszczalność dalej zalegających partii ośrodka porowatego dla długich czasów, jak również *skin effect* i głębokości uszkodzenia/poprawy przepuszczalności wokół otworu w sposób zaprezentowany w publikacji [8].

2. Możliwe jest określenie przybliżonej wielkości przepuszczalności na podstawie pojedynczego pomiaru ciśnienia w otworze oraz odpowiadającego mu czasu, tak jak to po-

kazano w artykule. Obliczenia takie są jednak mało dokładne.

3. Zestaw pomiarowy jest bardzo prosty, a jego schemat ideowy pokazano na rysunku 1. Na ogół składa się on ze zbiornika ciśnieniowego i kompresora oraz sondy z dwoma pakerami uruchamianymi sprężonym gazem [5]. Zestaw taki używany jest przez Główny Instytut Górnictwa w Katowicach do obliczeń pola powierzchni szczelin na poboczniczy odizolowanego odcinka otworu, wskaźnika szczelinowości oraz sumarycznej rozwartości szczelin. Do obliczeń wyżej wymienionych wielkości używane są wzory empiryczne.
4. Podane zależności wyprowadzono przy założeniu radialnego charakteru przepływu płynów w złożu, w związku z czym rodzi się pytanie, czy mogą one być użyte do odcinkowego pomiaru przepuszczalności w drenażowym otworze poziomym, gdzie charakter przepływu w pobliżu końców odizolowanego odcinka ma charakter przestrzenny (trójwymiarowy). Zdaniem autorów w przypadku dłuższych odcinków pomiarowych (rzędu kilkudziesięciu cm) przepływ radialny dominuje na przeważającej długości odcinka pomiarowego (za wyjątkiem jego
5. Pomierzone przepuszczalności są duże jak na pokład węgla, którego przepuszczalność wynosi na ogół od ułamków do kilku miliardów. Należy jednak pamiętać, że z uwagi na bardzo krótki czas pomiaru dotyczą one tylko zeszcelinowanej strefy wokół otworu, czyli mierzona jest jedynie tzw. przepuszczalność szczelinowa. Dla takiej przepuszczalności obliczone wielkości są bardzo prawdopodobne. Należy również zwrócić uwagę na fakt, że pomiary nie były ukierunkowane na obliczenia przepuszczalności i ciśnienie zapięcia pakerów (podobnie jak różnica pomiędzy tym ciśnieniem a ciśnieniem w odizolowanym odcinku otworu) nie było duże. Zatem część doprowadzonego powietrza mogła przepływać wzdłuż osi otworu, przez strefę o przepuszczalności znacznie wyższej od przepuszczalności matrycy węgla, gdyż docisk pakerów nie spowodował całkowitej likwidacji przepuszczalności strefy przyotworowej na przeciw miejsc instalacji pakerów. Jeżeli taka sytuacja miałaby miejsce, to wyniki obliczeń przepuszczalności mogą być znacznie zawyżone.

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2017, nr 12, s. 935–942, DOI: 10.18668/NG.2017.12.04

Artykuł nadesłano do Redakcji 5.09.2017 r. Zatwierdzono do druku 16.10.2017 r.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt.: *Testy hydrodynamiczne: Metodyka interpretacji testów dla oceny parametrów zbiornikowych pokładów węgla w otworach pionowych i poziomych* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr zlec.: 14/SI/17, nr archiwalny: DK-4100-1/17.

Literatura

- [1] Aguilera R.A., Artindale J.S. i in.: *Horizontal wells*. Gulf Publishing Co., Houston 1991, vol. 9.
- [2] Kuchuk F.: *Well test interpretation for horizontal wells*. JPT, January 1995.
- [3] McKinley R.M.: *Wellbore transmissibility from afterflow dominated pressure buildup data*. Journal Petroleum Technology 1971, vol. 23, s. 863–827.
- [4] Moska R., Kędzior S.: *Możliwości występowania niekonwencjonalnych akumulacji gazu ziemnego w serii mułowcowej na terenie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego*. Nafta-Gaz 2015, nr 10, s. 729–736, DOI: 10.18668/NG2015.10.03.
- [5] Nierobisz A.: *Sonda areometryczna jako narzędzie do badania szczelinowości górotworu*. Przegląd Górniczy 2014, nr 3, s. 65–70.
- [6] Odeh A.S., Babu D.K.: *Transient flow behavior of horizontal wells, pressure draw down and build up analyses*. SPE 18802 PA.
- [7] Szpunar T.: *How to compute permeability and skin factor of the low pressure water zones*. Journal of Canadian Petroleum Technology 2001, vol. 40, nr 7, s. 1–7.
- [8] Szpunar T., Budak P.: *How to assess a depth of permeability impairment of the well-bore zone using drillstem-testing flow-period data*. Journal of Canadian Petroleum Technology 2012, vol. 51, nr 3, s. 215–222.
- [9] Szpunar T., Budak P.: *Prosta metoda określania przepuszczalności pokładów węgla w warunkach kopalnianych*. Nafta-Gaz 2016, nr 12, s. 1054–1062, DOI: 10.18668/NG.2016.12.07.



Dr inż. Tadeusz SZPUNAR
Adiunkt w Zakładzie Inżynierii Naftowej.
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: tadeusz.szpunar@inig.pl



Mgr inż. Paweł BUDAK
Starszy specjalista naukowo-badawczy, kierownik
Zakładu Inżynierii Naftowej.
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: pawel.budak@inig.pl