

Ocena możliwości zrzutu zasolonych wód poeksploatacyjnych do wyeksploatowanych odwiertów

Salt water discharge into porous rocks with or without an injection pump

Paweł Budak, Tadeusz Szpunar

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: W artykule omówiono zagadnienia zrzutu zasolonych wód poeksploatacyjnych do porowatych warstw chłonnych o niskim ciśnieniu złożowym – z zastosowaniem pompy lub bez niej. Podano warunki, jakie musi spełniać warstwa chłonna, oraz klasyfikację odwiertów zrzutowych według amerykańskiej Agencji Ochrony Środowiska (EPA) ze względu na ochronę wód pitnych. Zasygnalizowano, jakie warunki musi spełniać solanka wprowadzana do ośrodka porowatego, w tym dotyczące jej składu chemicznego, zawartości ciał stałych, obecności bakterii oraz zawartości olejów i tłuszczów. Podano sposoby określenia przepuszczalności warstwy o niskim ciśnieniu złożowym, z której brak jest samoczynnego wypływu i lustro cieczy stabilizuje się na pewnej głębokości poniżej poziomu terenu, w tym omówiono metodę tzw. *slug test* oraz metodę INiG – PIB opracowaną przez autorów. Podano warunki techniczne, których spełnienie wymagane jest do prawidłowego przeprowadzenia *slug testu*. Omówiono wady i zalety poszczególnych metod określania przepuszczalności w odwiertach, w których nie ma produkcji samoczynnej, oraz sposoby interpretacji wyników, jak również podkreślono prostotę interpretacji metodą INiG – PIB w porównaniu z metodą *slug testu*, wymagającą wpasowania krzywych pomiarowych do krzywych teoretycznych. Podano sposób przybliżonej oceny objętości wody zasolonej, którą można wprowadzić do otworu „na chłonność”, to jest bez użycia pompy, przy maksymalnym ciśnieniu hydrostatycznym odpowiadającym wypełnieniu otworu solanką „do wierzchu”, oraz objętości, którą można wtłoczyć za pomocą pompy przy ciśnieniu niższym od ciśnienia szczelinowania warstwy porowatej. Podano przykład obliczeniowy.

Słowa kluczowe: *slug test*, metoda wpasowania krzywych, dane ciśnieniowe okresu dopływu do rpz, czas bezwymiarowy, strefa przyodwiertowa, przepuszczalność, warstwa chłonna, otwór iniekcyjny.

ABSTRACT: Discussed are the problems related to salt water discharge into low pressure porous rocks, with or without an injection pump. Specified are conditions which the porous rock should satisfy to be classified as an injection one. The American Environmental Protection Agency (EPA) classification of injection wells is given as well as regulations regarding protection of drinking water sources. Considered are low pressure wells which do not flow to the surface i.e. in which the water table stabilizes at some depth below the ground level. It is assumed that the full column hydrostatic pressure is used to force the salt water flow into porous rock. Provided are parameters which make the salt water suitable for injection. Provided are the regulations regarding its chemical composition, solids content, presence of bacteria and oil/grease content which the salt water should meet. Discussed are the methods for evaluation of permeability of porous rocks in wells with reservoir pressure lower than the pressure exerted by the full column of salt water. Included here are slug test method and INiG – PIB method which are routinely used for evaluation of permeability of low pressure porous zones. Discussed are advantages and disadvantages of each method and analyzed are the testing procedures related to each of them. Presented is the technique for approximate evaluation of salt water volume which can be introduced into porous rock without using the injection pump and salt water volume which can be injected at pressures lower than the fracturing pressure of porous rock. Presented are the example calculations.

Key words: slug test; type curves; DST flow period; dimensionless time; near-wellbore zone; permeability, permeable rocks, injection well.

Wstęp

Zagospodarowanie dużych ilości wód poeksploatacyjnych nagromadzonych w wyniku separacji wody podczas eksploatacji odwiertów gazowych i ropnych może stanowić problem

z uwagi na przepisy dotyczące ochrony środowiska naturalnego oraz konieczność ochrony podziemnych zasobów wód pitnych. Narzucającym się sposobem zagospodarowania takich wód jest ich zrzut do odwiertów, z których zaprzestano eksploatacji mediów. Zrzut zasolonych wód do warstw wgłębnych przez

Autor do korespondencji: P. Budak, e-mail: pawel.budak@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 30.09.2021 r. Zatwierdzono do druku: 29.10.2021 r.

istniejące odwierty lub odwierty wykonane specjalnie w tym celu odbywa się nie tylko w przemyśle naftowym, ale również spożywczym, chemicznym, petrochemicznym i innych.

Zrzut cieczy do warstw wglębnych nie może powodować zanieczyszczenia zasobów wód pitnych, to jest takich, w których zawartość rozpuszczonych części stałych nie jest większa od 10 000 mg/litr. Zawartość rozpuszczonych części stałych w wodzie z warstw wglębnych nie przekracza na ogół 3000 mg/litr. W praktyce każda woda, która po uzdatnieniu nadaje się do spożycia, powinna być odpowiednio chroniona przed zanieczyszczeniem. Amerykańska Agencja Ochrony Środowiska (EPA) proponuje podzielenie odwiertów iniekcyjnych na pięć klas, przy czym kryterium klasyfikacji był rodzaj zatłaczanego płynu oraz głębokość warstwy chłonnej i jej usytuowanie względem warstw wody pitnej. W tabeli 1 przedstawiono opis poszczególnych klas odwiertów iniekcyjnych według kryteriów podanych w *Safe Drinking Water Act* amerykańskiej Agencji Ochrony Środowiska.

Odwierty należące do klasy IV są zakazane na terenie USA i Europy.

Odpady płynne są produktem ubocznym szeregu procesów przemysłowych. Wyroby takie jak stal, tworzywa sztuczne, wyroby farmaceutyczne i wiele innych nie mogłyby powstać bez użycia wody. Pomimo stosowania recyklingu i innych sposobów ograniczenia ilości odpadów ciekłych nadal wytwarzane są one w dużych ilościach, co wymaga ich bezpiecznej utylizacji. Stosowane jest spalanie tych odpadów, obróbka chemiczna oraz składowanie w zbiornikach ziemnych. Jednym z większych źródeł odpadów ciekłych są ścieki miejskie, które po odpowiedniej obróbce mogą być odprowadzane do rzek lub cieków powierzchniowych.

Jedną z form zagospodarowania ciekłych odpadów miejskich i przemysłowych jest ich iniekcja do pokładów izolowanych od warstw wody pitnej, co według EPA jest dozwolone, jeżeli odwierty iniekcyjne spełniają rygorystyczne wymagania odpowiednich przepisów. Według EPA głębokość odwiertów

klasy I, które generalnie przeznaczone są do zrzutu solanek, wynosi na ogół od 500 m do 3000 m, natomiast większość formacji geologicznych zawierających wodę słodką zalega na znacznie mniejszych głębokościach. Ponieważ zrzut odpadów odbywa się generalnie do warstw położonych poniżej najgłębszego potencjalnego źródła wody pitnej, zatem prawdopodobieństwo negatywnych oddziaływań na jakość wody jest na ogół niewielkie.

Odwierty iniekcyjne mogą być również wykorzystane do podtrzymania ciśnienia złożowego, jeżeli zlokalizowane są na obrzeżach złoża. Wymagania dotyczące odwiertów iniekcyjnych przeznaczonych do zrzutu solanek, w tym odnoszące się do konstrukcji i szczelności tych odwiertów, oraz ograniczenia dotyczące parametrów, składu chemicznego, zawartości fazy stałej, obecności bakterii, zawartości olejów i smarów oraz inne wymagania stawiane zatłaczanym solankom omówiono szczegółowo w pracy Harju (1997) i we wspomnianych wcześniej regulacjach (EPA). Sposoby określania przepuszczalności horyzontów chłonnych o niskim ciśnieniu złożowym przy braku samoczynnej produkcji omówiono w pracach Szpunara (1995, 1999, 2001), Szpunara i Budaka (2002, 2020) oraz Lyu et al. (2018).

Metody oceny parametrów warstw chłonnych

Spośród wszystkich wymienionych czynników wpływających na chłonność warstwy i jej przydatność do zrzutu solanek poeksploacyjnych największe znaczenie ma przepuszczalność. Do pozostałych czynników należą: miąższość, współczynnik ściśliwości układu warstwa chłonna–płyn ją nasycający oraz rozciągłość warstwy chłonnej. Znajomość miąższości i rozciągłości, w powiązaniu ze znajomością współczynnika ściśliwości, porowatości i wielkości nasyceń, pozwala określić wielkość dostępnej przestrzeni porowej, którą można wypełnić przeznaczoną do zatłaczania cieczą.

Tabela 1. Klasyfikacja odwiertów iniekcyjnych (EPA)

Table 1. Classification of injection wells (EPA)

Klasa odwiertu iniekcyjnego według EPA	Przeznaczenie odwiertu iniekcyjnego
Klasa I	Odwierty przeznaczone do zrzutu odpadów ciekłych do warstw zalegających na głębokości większej od najgłębszych warstw wody pitnej
Klasa II	Odwierty przeznaczone do magazynowania cieczy związanych z eksploatacją ropy i gazu (na przykład solanek z separatorów, odpadów płuczkowych)
Klasa III	Odwierty przeznaczone do zrzutu cieczy powstających przy eksploatacji minerałów (na przykład solanek powstałych przy eksploatacji siarki, budowie solnych kawern magazynowych itp.)
Klasa IV	Odwierty przeznaczone do magazynowania odpadów niebezpiecznych lub radioaktywnych poniżej lub powyżej warstw będących źródłem wody pitnej
Klasa V	Odwierty nienależące do żadnej z powyższych klas, wykorzystywane do zrzutu odpadów ciekłych niestwarzających zagrożeń

Rodzaj i miąższość warstwy chłonnej określone są na podstawie profilowań geofizycznych, badań rdzeni oraz danych geologicznych z danego rejonu. Rozciągłość warstwy chłonnej, kształt obszaru drenażu, obecność uskoków lub nieciągłości, które mogą wpływać na przebieg zatłaczania lub zmienność chłonności w czasie, określa się na podstawie analizy budowy geologicznej rejonu, wyników badań sejsmicznych i innych. Istnieje możliwość określenia rozciągłości warstwy chłonnej, jej kształtu oraz lokalizacji odwiertu względem granic obszaru drenażu w wyniku przeprowadzenia testu hydrodynamicznego (tzw. *limit off test*). Czas trwania takiego testu (odbierania płynu z odwiertu lub zatłaczania) jest jednak bardzo długi – na ogół szereg miesięcy lub nawet lat.

Metody określania przepuszczalności i skin efektu warstw chłonnych

Znajomość przepuszczalności i skin efektu warstwy chłonnej ma znaczenie zasadnicze, ponieważ parametry te determinują jej przydatność do zrzutu solanki. Do określenia tych parametrów służą testy hydrodynamiczne. Do interpretacji danych pomiarowych testów otworowych wykorzystuje się zależności wiążące ciśnienie denne ruchowe z czasem przepływu lub odbudowy ciśnienia. Zależności te są rozwiązaniami równania typu dyfuzji opisującego zmiany ciśnienia podczas przepływu medium złożowego do odwiertu lub podczas odbudowy ciśnienia w odwiercie przy rozmaitych warunkach początkowych i brzegowych. Przy wyprowadzaniu tych zależności założono przepływ radialny oraz przyjęto, że natężenie przepływu medium złożowego do odwiertu (lub natężenie przepływu podczas zatłaczania do odwiertu) jest stałe.

W przypadku udostępnienia warstwy przepuszczalnej o niskim ciśnieniu złożowym lustro cieczy ustala się na pewnej głębokości poniżej poziomu terenu, dla której ciśnienie hydrostatyczne równoważy ciśnienie złożowe. Odpompowanie lub wlanie do odwiertu pewnej porcji cieczy powoduje zaburzenie tej równowagi. W okresie powrotu do stanu równowagi ciśnień lustro cieczy podnosi się lub opada w zależności od tego, czy odpompowano, czy wiano do odwiertu ciecz. Początkowo szybkość podnoszenia/opadania jest duża, a następnie, w miarę upływu czasu, maleje do zera w momencie przywrócenia stanu równowagi ciśnień w odwiercie. W okresie tym zmienia się zarówno ciśnienie naprzeciw udostępnionego horyzontu, jak i natężenie cieczy wpływającej lub wypływającej z tego horyzontu.

Ponieważ natężenie przepływu zmienia się w czasie, zatem nie można wykorzystać do interpretacji pomierzonych zmian ciśnienia standardowych zależności wyprowadzonych przy założeniu stałego natężenia wypływu/wpływu cieczy

do/ze złoża i konieczne jest korzystanie z metod wpasowania krzywych (*slug testu*) lub metod opracowanych przez autorów w INiG – PIB.

Zakładamy, że w warstwie porowatej wokół odwiertu występuje strefa o przepuszczalności różnej od reszty złoża, powstała w wyniku oddziaływania płuczki lub innych czynników. Jeżeli ciśnienie pomierzone podczas eksploatacji/zatłaczania różni się od ciśnienia przewidywanego przez model teoretyczny, to fakt ten przypisujemy istnieniu tej strefy. Ciśnienie na ścianie odwiertu może być wyższe lub niższe od ciśnienia teoretycznego w zależności od tego, czy przepuszczalność strefy przyodwiertowej jest wyższa, czy niższa od przepuszczalności dalszych partii złoża. Dodatkowa zmiana ciśnienia w strefie przyodwiertowej, spowodowana jej różną od reszty złoża przepuszczalnością, definiowana jest wzorem:

$$\Delta p_{skin} = \frac{Q\mu S}{2\pi kh} \quad (1)$$

Współczynnik skin efektu S określa zatem stan strefy przyodwiertowej. Mówimy, że jest ona uszkodzona, gdy $S > 0$, lub stymulowana, gdy $S < 0$. Gdy przepuszczalność strefy wokół odwiertu nie uległa zmianie, to $S = 0$ i na ścianie odwiertu jest: $p_{pomiarzone} = p_{teoretyczne}$. W ogólnym przypadku zachodzi:

$$p_{teoretyczne} = p_{pomiarzone} + \Delta p_{skin} \quad (2)$$

Sytuacja, gdy lustro cieczy ustala się na pewnej głębokości poniżej poziomu terenu, równoważąc ciśnienie złożowe, występuje na ogół w przypadku studni wierconych, odwiertów przeznaczonych do zrzutu substancji płynnych do porowatych warstw chłonnych, odwiertów hydrogeologicznych oraz udostępniających pokłady węgla. W celu określenia przepuszczalności i skin efektu pokładów zawodnionych o niskim ciśnieniu złożowym wykonywany jest najczęściej tzw. *slug test*, polegający na szybkim odpompowaniu pewnej ilości cieczy z odwiertu i określeniu współczynnika przepuszczalności k oraz skin efektu S na podstawie pomiarów przebiegu podnoszenia się lustra cieczy w funkcji czasu lub pomiaru zmian ciśnienia dennego w funkcji czasu.

Bardzo często *slug test* przeprowadza się za pomocą rurowego próbnika złoża (Ramey et al., 1975). Czas trwania testu i wyniki nie zależą od objętości odpompowywanej wody, a jedynym wymogiem jest odpowiednie obniżenie lustra cieczy w odwiercie.

Z uwagi na początkową dużą szybkość podnoszenia się lustra cieczy pomiary należy wykonywać co kilka sekund. W późniejszym okresie częstość pomiarów może być mniejsza z uwagi na wolniejsze podnoszenie się lustra.

Slug test jest uznaną metodą określania przepuszczalności oraz skin efektu warstw chłonnych o niskim ciśnieniu złożowym. Charakteryzuje się prostotą realizacji i niskim kosztem. Wadą *slug testu* jest określanie przepuszczalności i skin

efektu przez wpasowywanie krzywej pomierzonej do jednej z krzywych teoretycznych, których kształt dla rozmaitych przepuszczalności jest bardzo podobny, a zatem w przypadku niedokładnego wpasowania można otrzymać błędne wyniki. Interpretacja metodą *slug testu* nie daje zatem jednoznacznych wyników, co z punktu widzenia inżyniera praktyka stanowi wadę. Metodą pozwalającą na jednoznaczne określenie przepuszczalności k oraz współczynnika skin efektu S jest metoda opracowana w INiG – PIB, której autorami są: Szpunar (2001) oraz Szpunar i Budak (2012).

Założenia początkowe i warunki brzegowe przedstawionego w tym artykule modelu matematycznego są identyczne jak przyjęte w metodzie *slug testu*. Metoda INiG – PIB umożliwia określenie przepuszczalności oraz skin efektu i nadaje się do interpretacji danych ciśnieniowych okresu przyływu do rurowego próbnika złoża (rpz). Zaletą przedstawionej metody jest prostota i jednoznaczność otrzymanych wyników, tj. przepuszczalności, skin efektu i ewentualnie zasięgu strefy o zmienionej przepuszczalności.

W pracach Szpunara i Budaka (2002, 2020) podano podstawy matematyczne oraz pokazano sposób wykorzystania metody INiG – PIB (Szpunar, 2001) do określania przepuszczalności złoża, przepuszczalności strefy przyodwiertowej, skin efektu oraz głębokości uszkodzenia przepuszczalności złoża Δr , która obliczana jest za pomocą wzoru:

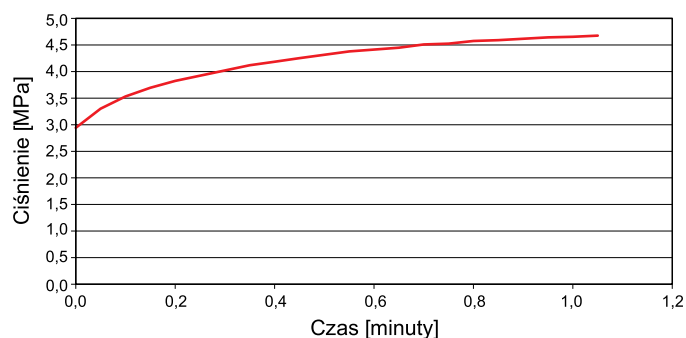
$$\Delta r = r_w \left(e^{\frac{S k_p}{k - k_s}} - 1 \right) \quad (3)$$

Liczne przykłady porównania wyników interpretacji danych pomiarowych podawanych w literaturze oraz danych z krajowego przemysłu naftowego wykonanej metodą *slug testu* oraz metodą INiG – PIB przedstawiono w pracy Szpu-

nara i Budaka (2020), stwierdzając równoważność wyników obydwu metod.

Dane otworowe zinterpretowano metodą *slug testu* i metodą INiG – PIB. Dane te posłużą do dalszych obliczeń objętości solanki, jaką można wprowadzić do warstwy porowatej metodą „na chłonność” i za pomocą pompy, nie przekraczając ciśnienia szczelinowania. Poniżej podano przykład obliczeń przepuszczalności metodą *slug testu* oraz metodą INiG – PIB dla następujących danych (rys. 1, tabela 2):

- początkowe ciśnienie złożowe $p_0 = 5,0$ MPa;
- początkowe ciśnienie przyływu (w chwili $t = 0$) $p_1 = 3,0$ MPa;
- miąższość warstwy chłonnej $h = 99$ m;
- porowatość horyzontu chłonnego $\phi = 0,25$;
- promień odwiertu $r_w = 0,076$ m;
- gęstość solanki (cieczy złożowej) $\rho = 1000$ kg/m³;
- lepkość solanki (cieczy złożowej) $\mu = 1$ mPas;
- współczynnik ściśliwości układu skała złożowa–płyn ją nasycający $c = 2,88 \cdot 10^{-3}$ 1/MPa.



Rys. 1. Zmiany ciśnienia dennego ruchowego w funkcji czasu

Fig. 1. Bottomhole flowing pressure vs. time

Tabela 2. Zależność ciśnienia dennego ruchowego od czasu z przyływu

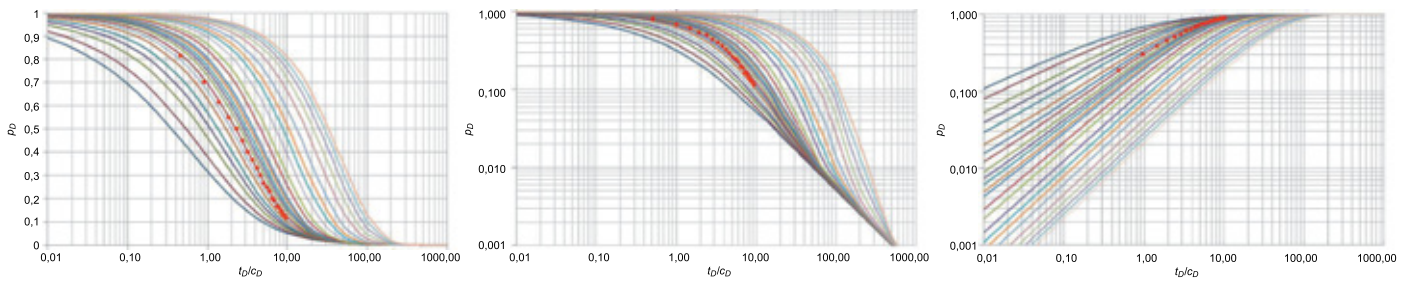
Table 2. Bottomhole flowing pressure vs. time

Czas		Ciśnienie dennego ruchowe [MPa]
[sekundy]	[minuty]	
3	0,05	3,30
6	0,10	3,53
9	0,15	3,70
12	0,20	3,82
15	0,25	3,92
18	0,30	4,02
21	0,35	4,12
24	0,40	4,19
27	0,45	4,25
30	0,50	4,31
33	0,55	4,38
36	0,60	4,41
39	0,65	4,45

cd. Tabela 2/ cont. Table 2

Czas		Ciśnienie dennego ruchowe [MPa]
[sekundy]	[minuty]	
42	0,70	4,51
45	0,75	4,52
48	0,80	4,58
51	0,85	4,59
54	0,90	4,62
57	0,95	4,64
60	1,00	4,65
63	1,05	4,68

Slug test – wyniki obliczeń (rys. 2, tabela 3)



Rys. 2. Od lewej: wpasowanie do krzywych teoretycznych: całej krzywej pomiarowej, części końcowej (długie czasy) i początkowej (wczesne czasy)

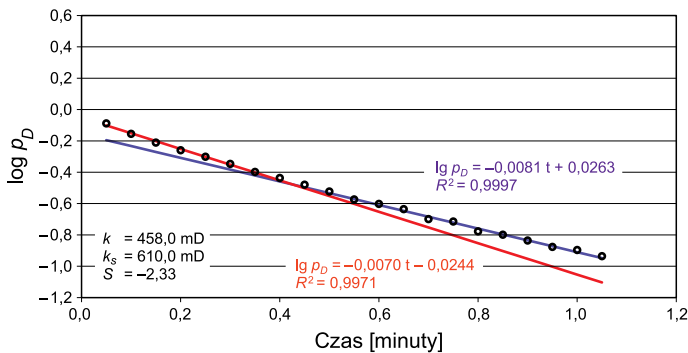
Fig. 2. From the left: fitting into theoretical curves: the entire measurement curve, end part (long time data) and start part (early time data)

Tabela 3. Wyniki obliczeń metodą slug test

Table 3. Results of the slug test method

Wpasowanie pomiarowej do rodziny krzywych teoretycznych	Współczynnik hydroprzepuszczalności	Przepuszczalność	Współczynnik skin efektu	Parametr krzywej teoretycznej
	kh [mD·m]	k [mD]	S [-]	
Cała krzywa	44 982	454,37	-1,1589	200
Część końcowa	44 661	451,12	-1,1589	200
Część początkowa	45 712	461,74	-1,1589	200

Metoda INiG – PIB – wyniki obliczeń (rys. 3)



Rys. 3. Wykres zależności logarytmu ciśnienia bezwymiarowego od czasu

Fig. 3. Logarithm of dimensionless pressure vs. time

Przepuszczalność warstwy chłonnej $k = 458,0$ mD.
 Przepuszczalność strefy przyodwiertowej $k_s = 610,0$ mD.
 Współczynnik skin efektu $S = -2,33$.

Sposób przybliżonej oceny możliwości zrzutu zasolonych wód poeksploatacyjnych do warstw chłonnych

Usuwanie wód złożowych z eksploatowanych odwiertów oraz wód otrzymanych w procesie separacji węglowodorów wymaga rozwiązania problemu ich zagospodarowania. Do obliczeń objętości wody, którą można wprowadzić „na chłonność”

i przez zatłoczenie pompą, muszą być znane: przepuszczalność, wielkość skin efektu, ciśnienie złożowe, miąższość, porowatość i ściśliwość warstwy chłonnej, jak również lepkość cieczy zatłaczanej oraz kształt i wielkość obszaru drenażu. Znajomość wymienionych wielkości pozwala na określenie:

- maksymalnego początkowego wydatku solanki, którą można wprowadzić do warstwy chłonnej bez potrzeby uruchamiania pompy;
- objętości solanki, jaką można wprowadzić do horyzontu chłonnego pod ciśnieniem hydrostatycznym (bez użycia pompy);
- objętości solanki, jaką można wprowadzić do horyzontu chłonnego przy użyciu pompy przy ciśnieniach nieprzekraczających ciśnienia szczelinowania.

Poniżej podano podstawowe zależności umożliwiające określenie wielkości wymienionych powyżej oraz zilustrowano obliczenia na przykładzie przedstawionych wcześniej danych i wyników obliczeń przepuszczalności.

Jak powiedziano, w przypadku niskiego ciśnienia złożowego w wyeksploatowanym zawodzionym odwiercie lustro cieczy ustala się na pewnej głębokości poniżej terenu. Wlewanie cieczy do odwiertu z wydajnością niepowodującą wypływu z odwiertu prowadzi do podniesienia się lustra cieczy i ustalenia na pewnej nowej głębokości, która przy utrzymaniu stałego wydatku będzie się powoli zmniejszać (poziom lustra cieczy będzie się podnosić w miarę wzrostu ciśnienia w strefie przyodwiertowej, aż do osiągnięcia poziomu terenu). W sytuacji, gdy lustro cieczy znajdzie się na poziomie terenu,

utrzymywanie poprzedniego stałego wydatku nie będzie możliwe, gdyż część wlewanej cieczy będzie wypływać z odwiertu, a zatem należy ustalić nowy, niższy wydatek wlewania cieczy, przy którym cała jej objętość przyjmowana będzie przez warstwę chłonną, lub kontynuować zatłaczanie na chłonność przy użyciu pompy.

Równanie wiążące wielkość ciśnienia dennego ruchowego z czasem dla nieustalonego stanu przepływu przy zatłaczaniu cieczy do warstwy chłonnej ze stałą wydajnością ma, w jednostkach przemysłowych, postać:

$$p_{dr}(t)[\text{MPa}] = p_0[\text{MPa}] + 51,91 \frac{Q[\text{m}^3/\text{godz}]\mu[\text{mPas}]}{k[\text{mD}]h[\text{m}]} \cdot \left(\lg \frac{k[\text{mD}]t[\text{godz}]}{\phi\mu[\text{mPas}]c[1/\text{MPa}]r_w^2[\text{m}^2]} - 2,1 - 0,975 \right) \quad (4)$$

Jeżeli kształt obszaru objętego zmianami ciśnienia jest regularny, przepływ jest radialny, a odwiert wykonany jest w środku obszaru drenażu, to po czasie (tzw. czasie bezwymiarowym):

$$t_{DA} = kt/\phi\mu cA \geq 0,1 \quad (5)$$

następuje zmiana charakteru przepływu w złożu z nieustalonego (równanie (4)) na pseudoustalony, co powoduje, że charakter zmian ciśnienia dennego w funkcji czasu jest inny. Po przeliczeniu (5) na jednostki przemysłowe otrzymamy:

$$t[\text{godz}] = 28,36 \frac{\phi\mu[\text{mPas}]c[1/\text{MPa}]}{k[\text{mD}]} \geq 0,1 \quad (6)$$

Dla t spełniającego powyższą nierówność, czyli dla regularnego obszaru drenażu z odwiertem usytuowanym centralnie, charakter przepływu staje się pseudoustalony i równanie wiążące ciśnienie dennego ruchowe z parametrami złoża, jego kształtem i powierzchnią ma postać:

$$p_{dr}(t) = p_0 + \frac{Q\mu}{2\pi kh} \left(\frac{1}{2} \ln \frac{4A}{\gamma C_A r_w^2} + 2\pi \frac{kt}{\phi\mu cA} + S \right) \quad (7)$$

Równanie (7) po przeliczeniu na przemysłowy układ jednostek ma postać:

$$p_{dr}(t)[\text{MPa}] = p_0[\text{MPa}] + \frac{442Q \left[\frac{\text{m}^3}{\text{godz}} \right] \mu[\text{mPas}]}{k[\text{mD}]h[\text{m}]} \cdot \left(\frac{1}{2} \ln \frac{4A[\text{m}^2]}{1,782C_A r_w^2[\text{m}^2]} + \frac{2,26 \cdot 10^{-3} k[\text{mD}]t[\text{godz}]}{\phi\mu[\text{mPas}]c \left[\frac{1}{\text{MPa}} \right] A[\text{m}^2]} + S \right) \quad (8)$$

Przykład

W celu zilustrowania procedury obliczeń przyjęto parametry złożowe i zbiornikowe warstwy chłonnej, w tym przepuszczalność i współczynnik skin efektu, obliczone w przykładzie przedstawionym wcześniej, przy okazji prezentacji sposobów

szacowania tych wielkości. Pozostałe dodatkowe dane konieczne do wykonania obliczeń to:

- lepkość solanki przeznaczonej do zrzutu $\mu = 1 \text{ mPas}$;
- gęstość zrzucanej solanki $\rho = 1050 \text{ kg/m}^3$;
- pole powierzchni obszaru drenażu $A = 196\,250 \text{ m}^2$;
- współczynnik kształtu obszaru drenażu $C_A = 31,6$;
- czas bezwymiarowy $t_{DA} = 0,1$.

Przyjmujemy kołowy kształt obszaru drenażu, z odwiertem umieszczonym centralnie, dla którego współczynnik $C_A = 31,6$, a czas $t_{DA} = 0,1$. W przypadku innego kształtu obszaru drenażu należy skorzystać z tabel współczynników kształtu C_A oraz czasu bezwymiarowego t_{DA} odpowiadających pseudoustalonym warunkom przepływu w złożu, przyjętemu kształtowi złoża i usytuowaniu odwiertu względem granic drenowanego obszaru (Dake, 1979).

Zatłaczanie na chłonność bez użycia pompy – pod wpływem ciśnienia hydrostatycznego – jest możliwe w przypadku, gdy na warstwę chłonną wywierane jest ciśnienie hydrostatyczne wyższe od złożowego. Maksymalnemu ciśnieniu hydrostatycznemu, które można wyrzeć na złożu (czyli po wypełnieniu solanką całego odwiertu do wierzchu i podtrzymywaniu tego poziomu solanki), odpowiada wydatek maksymalny Q_{\max} (rys. 4). Ponieważ maksymalne ciśnienie hydrostatyczne, które można wyrzeć na warstwę chłonną, równe jest:

$$p_{dr\text{hydr}\max} [\text{MPa}] = 10^{-6} g [\text{m/s}^2] \rho [\text{kg/m}^3] \cdot H [\text{m}] \quad (9)$$

gdzie: H to średnia głębokość warstwy chłonnej, g – przyspieszenie ziemskie, a zatem w rozważanym przypadku wynosi ono $8,75 \text{ MPa}$ a z równania (8) dla stanu pseudoustalonego otrzymamy dla $t = 1 \text{ godz.}$:

$$Q_{\max} = \frac{(p_{dr\text{hydr}\max} - p_0)kh}{4,42 \cdot 10^2 \mu \left(\frac{1}{2} \ln \frac{4A}{1,782C_A r_w^2} + \frac{2,26 \cdot 10^{-3} kt}{\phi\mu cA} + S \right)} \cong 65,54 \frac{\text{m}^3}{\text{godz}} \quad (10)$$

lub $18,2 \text{ l/s}$. Obliczony przybliżony wydatek odpowiada objętości solanki, jaką warstwa chłonna początkowo może przyjąć w jednostce czasu po wypełnieniu solanką odwiertu do wierzchu i utrzymywaniu tego poziomu. Wydatek ten będzie malał w miarę upływu czasu od wielkości maksymalnej do zera, ponieważ podnosić się będzie ciśnienie w strefie przyodwiertowej, a zatem maleć będzie do zera różnica pomiędzy $p_{dr\text{hydr}\max}$ a tym ciśnieniem. Obliczony wydatek jest zatem wydatkiem maksymalnym chwilowym.

W miarę kontynuacji wlewania solanki „na chłonność” ciśnienie w warstwie chłonnej wokół odwiertu rośnie. W momencie gdy zrówna się ono z maksymalnym ciśnieniem hydrostatycznym, dalsze wlewanie solanki bez użycia pompy nie jest możliwe, gdyż wypływać będzie ona z odwiertu. Jeżeli

zaprzestaniemy wprowadzania solanki do warstwy chłonnej, to ciśnienie w strefie przyodwiertowej stopniowo opadnie i ustabilizuje się na nowym, wyższym poziomie, co umożliwi po pewnym czasie kontynuację wprowadzania solanki na chłonność. Cykl taki można wielokrotnie powtarzać. Wykonane obliczenia stanowią jedynie inżynierskie przybliżenie wielkości rzeczywistych, gdyż teoretycznie natężenie wpływu solanki w trakcie wlewania jej na chłonność jest funkcją czasu. Przy wyprowadzaniu powszechnie stosowanych wzorów (4) i (8) przyjmowane jest stałe natężenie wpływu/wypływu cieczy, ponieważ takie założenie umożliwia otrzymanie efektywnych rozwiązań analitycznych pozwalających na interpretację testów otworowych, przewidywanie zachowania złoża itp.

W rozpatrywanym przypadku czas obowiązywania stanu nieustalonego (czyli równania (8)) dla obszaru drenażu w kształcie koła z centralnie usytuowanym odwiertem równy jest:

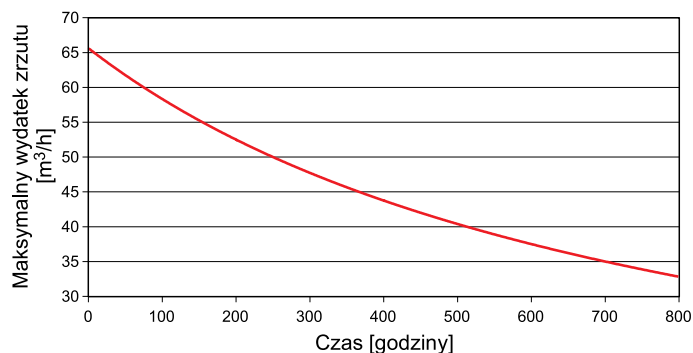
$$t = 28,36 \frac{\phi \mu c A}{k} = 0,88 \text{ godz} \quad (11)$$

czyli dla $t < 0,88$ godz występuje stan nieustalony i obowiązuje równanie (4), natomiast dla czasów dłuższych przepływ w złożu ma charakter pseudoustalony i obowiązuje równanie (8). Z powyższych obliczeń wynika, że w konkretnym przypadku nieustalony stan przepływu (równanie (4)) nie odgrywa większej roli z uwagi na krótki czas jego obowiązywania i zagadnienie zrzutu solanki należy rozpatrywać, przyjmując pseudoustalony stan przepływu w złożu (równanie (8)).

W obliczeniach objętości solanki, jaką można wprowadzić „na chłonność” do warstwy porowatej, przyjmujemy, że w odwiercie utrzymywane jest maksymalne ciśnienie hydrostatyczne (odwiert wypełniony do wierzchu) w poszczególnych interwałach czasowych, na które dzielimy czas iniekcji, oraz że natężenie wpływu solanki do warstwy można przyjąć za stałe dla każdego interwału czasu i można je obliczyć z równania (8). Sumaryczna objętość, którą można wprowadzić bez użycia pompy, równa będzie sumie wydajności w poszczególnych interwałach czasowych pomnożonych przez długość tego interwału.

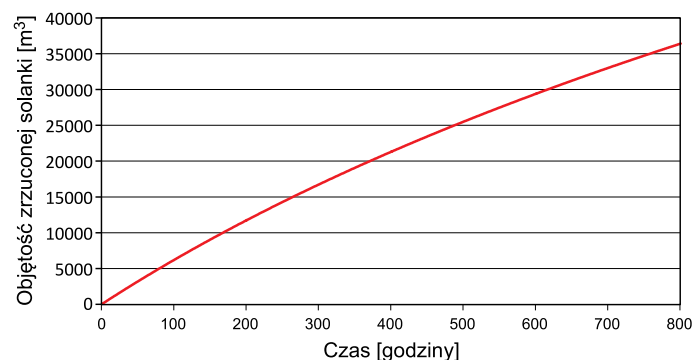
Wlewanie na chłonność kontynuowane jest do momentu spadku wydajności do poziomu, dla którego dalsza kontynuacja zabiegu przestaje być uzasadniona technicznie. Wydajności tej odpowiada ciśnienie p_{fin} .

Przyjmując z kolei w (8), że gradient ciśnienia szczelinowania równy jest 0,022 MPa/m, otrzymamy $p_{dr} = p_{szczel} \cong \cong 18,69$ MPa oraz zakładając, że wydatek tłoczenia równy jest $Q = 20$ m³/godz, otrzymamy z (8) $t = 6959$ godz, czyli do momentu wzrostu ciśnienia naprzeciw warstwy chłonnej od poziomu p_{fin} (ciśnienie, jakie uzyskano po zaprzestaniu wlewania na chłonność) do poziomu ciśnienia szczelinowania, przy utrzymaniu wydatku zatłaczania 20 m³/godz, upłynie 6959 godz.



Rys. 4. Poglądowa zależność wydajności zrzutu solanki „na chłonność” od czasu

Fig. 4. Visual relation of salt water inflow rate vs. time



Rys. 5. Poglądowa zależność objętości solanki wprowadzonej „na chłonność” od czasu

Fig. 5. Visual relation of salt water discharge rate vs. time

Zatem jak wynika z (8), w rozpatrywanym przypadku solankę można wlewać na chłonność, utrzymując odwiert wypełniony solanką do wierzchu (w sumie 36 500 m³), a przez następne 6959 godz należy zatłaczać ją pompą (6959 godz × 20 m³/godz = = 139 180 m³) (rys. 5), czyli w przypadku następującej po sobie kontynuacji obu cykli sumaryczna objętość solanki, jaką przyjmie warstwa chłonna, wyniesie 175 680 m³.

Wnioski

Znajomość przepuszczalności i skin efektu warstwy chłonnej ma znaczenie zasadnicze, ponieważ parametry te determinują jej przydatność do zrzutu solanki. W przypadku warstwy o niskim ciśnieniu złożowym (niższym od ciśnienia hydrostatycznego słupa medium złożowego o wysokości równej głębokości zalegania warstwy) natężenie przepływu zmienia się w czasie, zatem nie można w takiej sytuacji do określenia przepuszczalności wykorzystać standardowych zależności wyprowadzonych przy założeniu stałego natężenia wypływu cieczy ze złoża i konieczne jest zastosowanie metod wpasowania krzywych (*slug testu*) lub metod opracowanych przez INiG – PIB.

W podanym przykładzie czas trwania stanu nieustalonego był krótki i korzystano z zależności dla stanu pseudoustalonego. W przypadku złoż o innym kształcie, innym usytuowaniu odwiertu względem granic obszaru drenażu i mniejszej przepuszczalności przez pewien czas mogą obowiązywać zależności dla stanu nieustalonego.

Przedstawione obliczenia mają charakter poglądowy i przybliżony, szczególnie dla przypadku wlewania solanki na chłonność bez użycia pompy, gdyż w każdym z interwałów czasowych, na które podzielono czas zabiegu, wydatek solanki jest funkcją czasu.

Zaprezentowany sposób umożliwia przybliżone określenie objętości solanki, jaką można wprowadzić do warstwy chłonnej bez użycia pompy, oraz objętości solanki, jaką można zatłoczyć do warstwy chłonnej do poziomu ciśnienia szczelinowania.

Wykonane obliczenia stanowią inżynierskie przybliżenie wielkości rzeczywistych.

Oznaczenia:

- H – średnia głębokość warstwy chłonnej,
 p_0 – początkowe ciśnienie złożowe,
 p_1 – początkowe ciśnienie przyływu (w chwili $t = 0$),
 $p_{dr}(t)$ – ciśnienie denne ruchowe w chwili t ($t > 0$),
 $p_{dr\ hydr\ max}$ – maksymalne ciśnienie hydrostatyczne, które można wyrzucić na warstwę chłonną,
 p_{fin} – ciśnienie, jakie uzyskano w momencie wlewania solanki na chłonność,
 p_{szczel} – ciśnienie szczelinowania warstwy chłonnej,
 t_{DA} – czas bezwymiarowy,
 k – przepuszczalność skał warstwy chłonnej,
 k_s – przepuszczalność skał w strefie przyodwiertowej,
 ϕ – porowatość skał warstwy chłonnej,
 c – współczynnik ściśliwości układu skała złożowa–płyn złożowy,
 ρ – gęstość cieczy,
 μ – lepkość zrzucanej cieczy,
 h – miąższość warstwy chłonnej,
 A – powierzchnia obszaru drenażu,
 r_w – promień odwiertu,
 S – skin efekt,
 γ – stała Eulera (1,782),
 C_A – współczynnik kształtu obszaru drenażu,
 Q – wydatek zatłaczania cieczy,
 Q_{max} – maksymalny wydatek zatłaczania cieczy,
 t – czas.

Literatura

- Dake L.P., 1979. Fundamentals of Reservoir Engineering. Elsevier, Amsterdam–Oxford–New York. Second edition.
 Environmental Protection Agency (EPA). Safe Drinking Water Act (SDWA). <<https://www.epa.gov/sdwa>> (dostęp: 03.07.2021).
 Harju J., 1997. Reports on water well testing. Gas Tips, 3.
 Lyu W., Zeng L., Chen M., Qiao D., Fan J., Xia D., 2018. An approach for determining the water injection pressure of low-permeability reservoirs. *Energy Exploration & Exploitation*, 36(5):1210–1228. DOI: 10.1177/0144598718754374.
 Ramey H.J., Agarwal R.G., Martin I., 1975. Analysis of Slug Test or DST Flow Period Data. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 14(03). DOI: 10.2118/75-03-04.
 Szpunar T., 1995. Wybrane problemy przepuszczalności porowatych warstw zawodnionych. *Nafta-Gaz*, 11: 445–451.
 Szpunar T., 1999. Sposób określania przepuszczalności oraz skin efektu porowatych warstw zawodnionych o niskim ciśnieniu złożowym. *Nafta-Gaz*, 3: 134–144.
 Szpunar T., 2001. How to compute the permeability and skin of low pressure water zones. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 40(7): 45–51. DOI: 10.2118/01-07-03.
 Szpunar T., Budak P., 2002. Sposób oceny zasięgu uszkodzenia przepuszczalności strefy przyodwiertowej. *Nafta-Gaz*, 10: 539–545.
 Szpunar T., Budak P., 2012. How to assess a depth of permeability impairment of the wellbore zone using drillstem-testing flow-period data. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 51(3): 215–222. DOI: 10.2118/157852-PA.
 Szpunar T., Budak P., 2020. Comparison of techniques which use the DST flow period data for evaluation of reservoir parameters. *Nafta-Gaz*, 6: 377–386. DOI: 10.18668/NG.2020.06.03.



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



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