

Bogusław BIELEC*, Beata KĘPIŃSKA**

Testowanie badawcze „miękkiego kwasowania” w geotermalnych otworach chłonnych

Streszczenie: W trakcie eksploatacji złóż geotermalnych systemem otworów pracujących w „duplecie geotermalnym” występują często problemy związane z załaczaniem wody po odzysku energii lub wykorzystaniu jej do innych celów (rekreacja, balneoterapia). Jednym z takich problemów jest spadek chłonności na skutek procesów chemicznych oraz kolmatacji filtra i strefy okołofiltrowej. Filtr i część warstwy chłonnej w pobliżu filtra należą do najbardziej newralgicznych obszarów, w których zachodzą zjawiska mające decydujący wpływ na charakter pracy otworu chłonnego. W celu poprawy chłonności otworów ujmujących wodę geotermalną, przede wszystkim ze złóż w skałach węglanowych oraz piaskowcach o spoiwie węglanowym, stosuje się zazwyczaj zabieg kwasowania. Konwencjonalne kwasowanie wymaga jednak zazwyczaj użycia urządzenia wiertniczego, co czyni je dość kosztownym, stąd też stosowane jest głównie przy eksploatacji węglowodorów. Alternatywą dla konwencjonalnego kwasowania jest tzw. „miękkie kwasowanie” (ang. *soft acidizing*). W niniejszym artykule omówiono przebieg badawczych testów miękkiego kwasowania wykonanych w testowej instalacji geotermalnej. Badania w ramach projektu pn: „Opracowanie wytycznych projektowych poprawy chłonności skał zbiornikowych w związku z załaczaniem wód termalnych w polskich zakładach geotermalnych” przeprowadził zespół Pracowni Odnawialnych Źródeł Energii Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN w współpracy z Geotermią Mazowiecką S.A. Do badań wykorzystano nieeksploatowane wcześniej otwory geotermalne Skierniewice GT-1 i Skierniewice GT-2. W trakcie prac badawczych wykonano łącznie osiem testów miękkiego kwasowania. W trakcie sześciu z nich ciecz kwasująca o ściśle dobranym składzie podawana była przez przewód zabiegowy (ang. *coiled tubing*) bezpośrednio nad strefę złożową w otworze Skierniewice GT-2 na głębokość 2765 m. Natomiast w czasie dwóch testów ciecz kwasującą podawano bezpośrednio do obiegu wody złożowej. W artykule opisano przebieg jednego wybranego testu. Szczegółowe wyniki wszystkich badań opisane zostały w pracach Bujakowskiego i in. (2011) oraz Kępińskiej, Bujakowskiego [red. nauk.] i in. (2011). Do głównych przyczyn spadku chłonności otworu Skierniewice GT-2 należy zaliczyć zjawiska korozji i wytrącania wtórnych substancji mineralnych. Z analizy zmienności parametrów hydrodynamicznych wynika, że zabiegi stymulacji metodą miękkiego kwasowania dla odwiertu i skał zbiornikowych w Skierniewicach udrażniały w pewnym zakresie odwiert i strefę przyodwiertową, powodując wzrost chłonności. Ich efekty były jednak mniejsze i mniej trwałe niż efekty wywołane ciągłą korozją orurowania odwiertu i wtórnym wytrącaniem substancji mineralnych z wody geotermalnej, która ma wysoką mineralizację (ponad 100 g/dm³).

Słowa kluczowe: wody geotermalne, miękkie kwasowanie, indeks chłonności

* Dr inż., ** Dr hab. inż. Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Pracownia Odnawialnych Źródeł Energii, Kraków; e-mail: bielec@meeri.pl; bkepinska@interia.pl

Research testing of “soft acidizing” treatment in geothermal injection wells

Abstract: During the exploitation of geothermal systems operating in the wells doublet scheme, problems are commonly encountered with water injection after energy extraction from geothermal water or its use for other purposes (recreation, spas). One such problem is the drop in injectivity due to chemical processes and clogging of the filter and near-filter zone. The filter and part of the injection near-filter layer are the most critical areas in which the occurring phenomena have a decisive influence on the performance of an injection well. Acid treatment is the procedure generally used to improve the injectivity of wells exploiting geothermal water primarily from carbonate rocks and sandstones with carbonate binders. Conventional acid, however, usually requires the use of drilling equipment, which makes it quite expensive. It is used mainly in the exploitation of hydrocarbons. An alternative to conventional acid treatment is so-called “soft acidizing”. This article discusses the research process of soft acidizing treatment tests performed on a test geothermal installation. Research done under the project entitled: “Development of design guidelines to improve injectivity of reservoir rocks in relation to injection of geothermal waters in Polish geothermal installations” was conducted by a team from the Mineral and Energy Economy Research Institute of the Polish Academy of Sciences in collaboration with the Geotermia Mazowiecka S.A. During the project, previously unexploited geothermal wells, Skierniewice GT-1 and Skierniewice GT-2, were used. In total, eight tests of soft acidizing treatment were carried out during the research. During six of the tests acidizing fluid of a closely matched composition was injected by a coiled tubing just above the reservoir zone in the Skierniewice GT-2 well to a depth of 2,765 meters. During two other tests acidizing fluid was added directly into the geothermal water stream at the wellhead. This article describes one of the selected tests. The detailed results of all tests are described in the works by Bujakowski et al. (2011) and Kępińska, Bujakowski [sc. eds.] et al. (2011). The main reasons for the drop in injectivity of the Skierniewice GT-2 well include corrosion and precipitation of secondary minerals. These processes depend, among other things, on the flow rate and duration of injection of geothermal water. The analysis of the level of changes in the hydrodynamic parameters shows that stimulation procedures using a soft acidizing treatment for borehole and reservoir rocks in Skierniewice increased to some extent the injectivities of borehole and near-borehole zones. Their effects, however, were smaller and less persistent than the effects of the continuous well casing’s corrosion and precipitation of secondary minerals from geothermal water (which has a high mineralization of ca. 110 g/dm³).

Key words: geothermal water, soft acidizing, injectivity index

Wprowadzenie

Na świecie i w Polsce działają zakłady geotermalne wykorzystujące otwory pracujące w tzw. „dubletach geotermalnych” (otwór wydobywczy – otwór chłonny). O ile pobór wody geotermalnej nie nastrocza zazwyczaj większych trudności, o tyle proces jej zatłaczania po odzysku energii lub wykorzystaniu do innych celów (np. rekreacja, balneoterapia) wiąże się z występowaniem szeregu trudności. Do najważniejszych należą:

- pokonanie ciśnienia złożowego w otworze chłonnym,
- konieczność uzdatniania i dezynfekcji zatłaczanej wody (w przypadku wykorzystania jej do celów balneoterapeutycznych lub rekreacyjnych),
- spadek chłonności na skutek procesów chemicznych oraz kolmatacji filtra i strefy okołowiltrowej.

Filtr i część warstwy chłonnej w pobliżu filtra należą do najbardziej newralgicznych obszarów, w których zachodzą zjawiska mające decydujący wpływ na charakter pracy otworu chłonnego. Do zjawisk tych zaliczyć należy przede wszystkim:

- przytykanie filtra i strefy okołowiltrowej osadami i zawiesiną pochodzącą z niedostatecznie oczyszczonych wód zatłaczanych odwiertem chłonnym oraz produktami korozji orurowania odwiertu chłonnego,

- wydzielanie produktów reakcji pomiędzy wprowadzaną wodą geotermalną a warstwą chłonną,
- wydzielanie gazów, wprowadzonych z zatłaczaną wodą geotermalną,
- rozwój mikroorganizmów i powstawanie niekorzystnych zjawisk wywołanych przez ich metabolizm.

W skałach węglanowych i piaskowcach o spoiwie węglanowym zabiegiem najczęściej stosowanym dla poprawy chłonności jest kwasowanie. Kwasowania można podzielić na kilka rodzajów w zależności od zastosowanego kryterium. Rozpatrując ciśnienie tłoczenia kwasu można wyróżnić:

- kwasowanie przy ciśnieniu niższym od ciśnienia szczelinowania:
 - płukanie,
 - kwasowanie matrycy skalnej;
- kwasowanie przy ciśnieniu tłoczenia równym ciśnieniu szczelinowania,
- kwasowanie przy dużym ciśnieniu tłoczenia kwasu – hydrauliczne szczelinowanie kwasem.

Płukanie otworu – jego celem jest usunięcie uszkodzenia strefy okołowiertrowej (spowodowanego np. pracami wykonywanymi w otworze); stosuje się najczęściej niewielkie ilości kwasu (cieczy kwasującej).

Kwasowanie matrycy skalnej (kwasowanie typu matrix). Stosuje się w celu usunięcia uszkodzenia przepuszczalności w strefie okołowiertrowej oraz zwiększenia chłonności lub produktywności poprzez reakcję kwasu ze skałą zbiornikową. Pozwala na usunięcie osadów nagromadzonych wtórnie w szczelinach oraz rozpuszczanie (wytrawianie) skały na ściankach szczelin dla zwiększenia przepuszczalności.

Kwasowanie przy ciśnieniu tłoczenia równym ciśnieniu szczelinowania pozwala na usunięcie wtórnych osadów nagromadzonych w szczelinach oraz rozpuszczanie skały na ściankach szczelin dla zwiększenia przepuszczalności.

Hydrauliczne szczelinowanie kwasem wykonywane jest w skałach węglanowych. Do złoża wtłacza się kwas (ciecz kwasująca) pod ciśnieniem wyższym od ciśnienia szczelinowania. Metoda ta pozwala na zwiększenie efektywnego promienia otworu poprzez wytworzenie przewodzących szczelin sięgających w głąb skały zbiornikowej. Aby zapobiec zaciśnięciu powstałych szczelin tłoczy się do nich piasek.

1. „Miękkie kwasowanie” – wprowadzenie

W przypadku eksploatacji otworów geotermalnych pracujących z zatłaczaniem schłodzonych wód, w celu poprawy chłonności otworów metodą znacznie tańszą niż zabiegi „konwencjonalnego” kwasowania, nie wymagającą zastosowania urządzenia wiertniczego i dającą na ogół dobre efekty, jest tzw. „miękkie kwasowanie” (ang. *soft acidizing*; Ungemach, Ventre 1996; Ungemach 2004). Właśnie ze względów ekonomicznych, technologicznych i z uwagi na efektywność, ten rodzaj kwasowania szczególnie nadaje się do otworów i horyzontów geotermalnych.

W trakcie miękkiego kwasowania zatłaczana jest do otworu na ogół taka sama ilość cieczy kwasującej jak przy tradycyjnym (konwencjonalnym) kwasowaniu. Do podstawowych parametrów różniących oba zabiegi należą natomiast stężenie kwasu i czas

jego zatłaczania. Stężenie kwasu przy zabiegach miękkiego kwasowania jest zazwyczaj niskie, natomiast czas zatłaczania jest zdecydowanie dłuższy (przy tradycyjnym kwasowaniu wynosi kilka godzin, przy zabiegach miękkiego kwasowania – kilkadziesiąt godzin). Należy jednak pamiętać, że czas zatłaczania cieczy kwasującej wynika ze stężenia kwasu jakie powinno się uzyskać, przy czym każdorazowo należy oszacować jego minimalną wartość, powyżej której zatłaczana ciecz stymulująca będzie reaktywna. Podane powyżej parametry przyczyniają się do wydłużenia czasu oddziaływania kwasu. Można zatem powiedzieć, że miękkie kwasowanie sprowadza się do zatłoczenia tej samej objętości kwasu co przy tradycyjnym kwasowaniu, ale w znacznie dłuższym przedziale czasu.

Termin **ciecz kwasująca** używany jest dla określenia roztworu kwasu o znanym stężeniu i wody (zwykle geotermalnej ze stymulowanego układu) z domieszką inhibitora i/lub ewentualnie innych dodatków (np. biocydy). Roztwór jest dozowany do strumienia wody geotermalnej zatłaczanej do otworu chłonnego. Natomiast określenie **ciecz stymulująca** odnosi się do zatłaczanej do otworu w trakcie miękkiego kwasowania wody geotermalnej o pH zmodyfikowanym wskutek dodania do niej **cieczy kwasującej**.

W miękkim kwasowaniu roztwór kwasu (ciecz kwasująca) zatłacza się do strumienia wody geotermalnej zwykle z powierzchni, przy wlocie do otworu chłonnego, lub też niekiedy przy użyciu pomocniczej rurki zabiegowej o niewielkiej średnicy (giętki przewód; ang. *coiled tubing*). Przy tradycyjnym kwasowaniu roztwór kwasu jest natomiast tłoczony do poziomu złożowego za pomocą urządzenia wiertniczego.

Czas trwania zatłaczania uzależniony jest od odczynu pH/stężenia kwasu, jakie powinno być osiągnięte w zatłaczanej wodzie geotermalnej. Minimalne wartości wspomnianych parametrów muszą być za każdym razem dobrane dla konkretnego systemu geotermalnego i rodzaju uszkodzeń, jakie mają być usunięte dzięki zabiegom miękkiego kwasowania (Ungemach 2004).

Długi czas oddziaływania kwasu pozwala na rozpuszczenie w różnym stopniu osadów nagromadzonych na rurach (produkty korozji zawierające głównie siarczki, wytrącania wtórnych substancji mineralnych) powodujących zwiększenie tarcia i zmniejszenie prędkości przepływu, a także na filtry i w strefie okołowiertrowej. W przypadku ich usuwania czynnikiem decydującym jest nie tyle samo stężenie kwasu, ale czas jego oddziaływania. Oczywiście, do rozpuszczania osadów konieczne jest określone minimalne (progowe) stężenie cieczy stymulującej.

W przypadku stosowania zabiegów miękkiego kwasowania, z uwagi na zdecydowanie dłuższy czas oddziaływania kwasu niż w tradycyjnym kwasowaniu, należy zadbać o ochronę wyposażenia odwiertu chłonnego. Ciecz kwasująca podawana do obiegu wody geotermalnej oddziałuje nie tylko na produkty korozji i wtórne wytrącania substancji mineralnych. Reagować może także z wyposażeniem odwiertu (rury, pompa, kable) powodując jego uszkodzenie. Aby zapobiec temu zjawisku do cieczy kwasującej dodawane są specjalne substancje (inhibitory) w celu ograniczenia lub eliminacji korozji i wytrącania minerałów wtórnych w odwiercie i strefie przyodwiertowej oraz instalacjach powierzchniowych, przez które przepływa woda geotermalna (m.in. wymienniki ciepła, rurociągi przesyłowe). Celowi temu służy także stosowanie, oprócz rur stalowych, rur z niepodatnymi na korozję wykładzinami wewnętrznymi i rur z włókna szklanego. Aby zapobiec rozwojowi mikroorganizmów, jako domieszki w cieczy kwasującej używane są ponadto biocydy. Planując za-

bieg miękkiego kwasowania należy wziąć pod uwagę m.in. zgodność stosowanego kwasu z inhibitorami korozji/wytrącania substancji mineralnych i biocydów ze skałami zbiornikowymi. Kwasowanie w technologii tradycyjnej w głównej mierze dotyczy złoża, natomiast miękkie kwasowanie dedykowane jest zarówno do zarurowania jak i uszkodzenia strefy okołofiltrowej i złoża (Ungemach 2004).

Technologia miękkiego kwasowania dla oczyszczenia otworów i stymulacji strefy przyodwiertowej geotermalnych horyzontów wodonośnych wykorzystywana jest z powodzeniem na świecie m.in. w zakładach geotermalnych w Basenie Paryskim we Francji i w obszarze Basenu Północnoniemieckiego. Jej efektem jest znacząca i długotrwała poprawa produktywności i chłonności odwiertów oraz skał zbiornikowych związanych z formacjami osadowymi, przede wszystkim piaskowcami i wapieniami. W Polsce z pozytywnym skutkiem zastosowano środki i zabiegi ograniczające spadek chłonności w instalacji eksploatującej wody geotermalne z piaskowców w zakładzie geotermalnym w Pyrzycach (Parecki, Biernat 2007; Biernat i in. 2009, 2010).

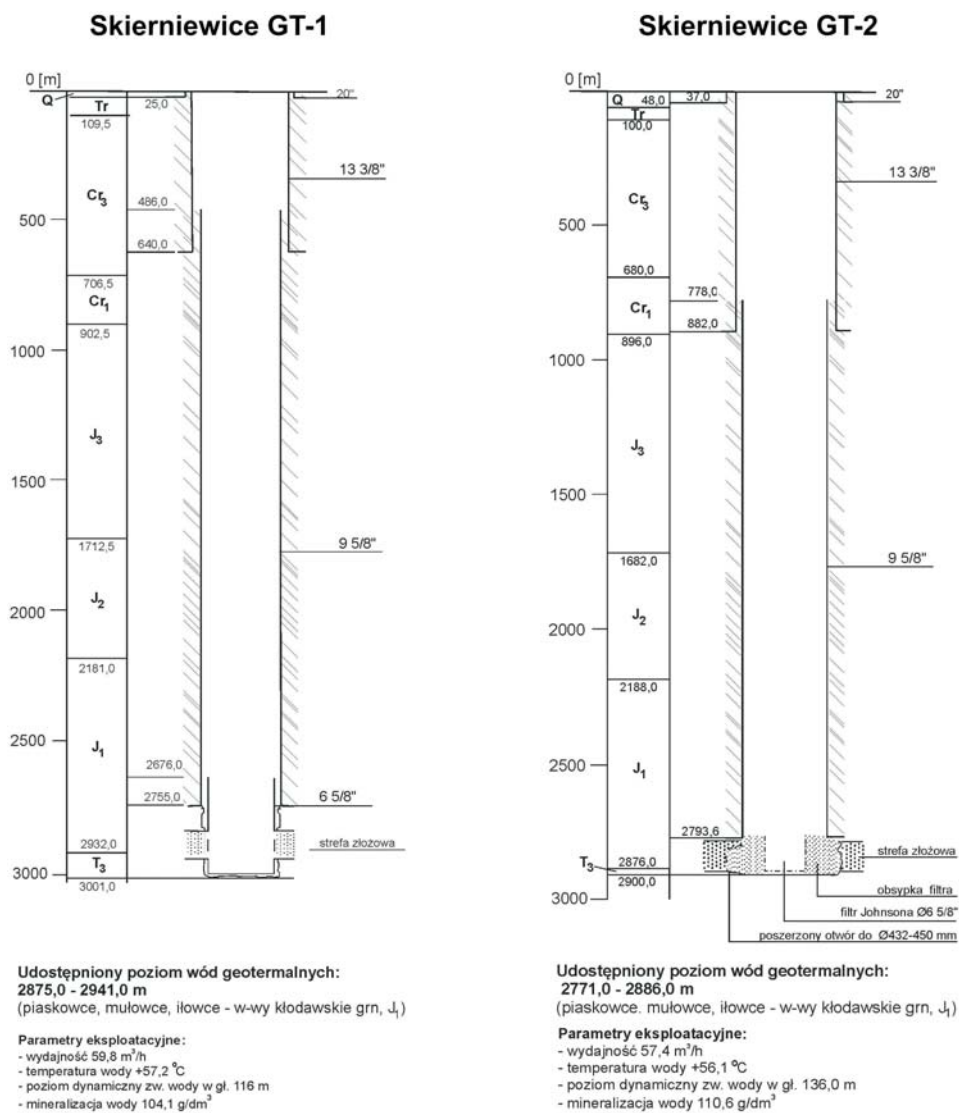
2. Prace przygotowawcze

Testowanie badawcze miękkiego kwasowania przeprowadzono dla instalacji geotermalnej w Skierniewicach w latach 2010 i 2011. Badania w ramach projektu pn: „Opracowanie wytycznych projektowych poprawy chłonności skał zbiornikowych w związku z zatłaczaniem wód termalnych w polskich zakładach geotermalnych” przeprowadził zespół Pracowni Odnawialnych Źródeł Energii Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN we współpracy z Geotermią Mazowiecką S.A. W tym celu wykorzystano nieeksploatowane wcześniej otwory geotermalne Skierniewice GT-1 i Skierniewice GT-2. Ich lokalizacja pokazana została na rysunku 1.

Otwór Skierniewice GT-1 o głębokości końcowej 3001 m został odwiercony w latach 1990–1991. Poziom wód geotermalnych znajduje się w głębokości 2875–2941 m (66 m) (rys. 2).

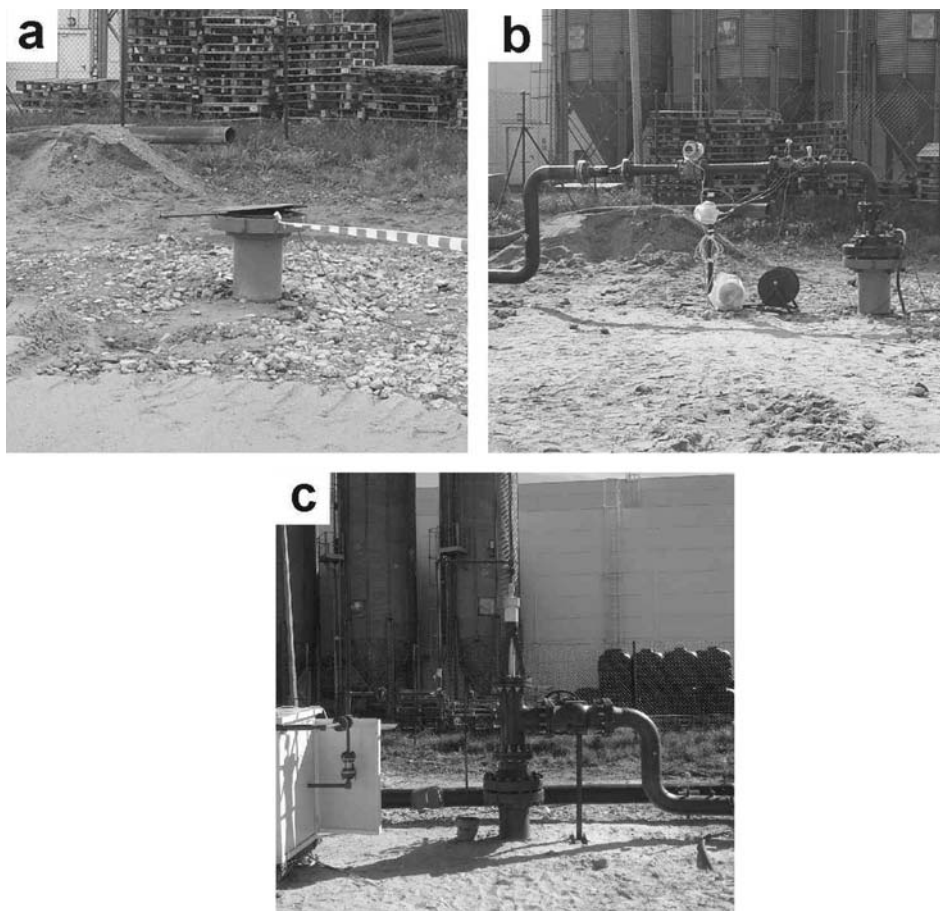
Jest to fragment warstw kłodawskich górnych (lias dolny – hetang) stwierdzonych w interwale 2752,5–2932,0 m. Warstwy te cechuje duża zmienność litologiczna – są to piaskowce, mułowce i ilowce. Utwory przepuszczalne (piaskowce) stanowią 40% profilu. Pakiety piaskowców grubo- i średnioziarnistych o najlepszych parametrach znajdują się w niższej części profilu. Porowatość efektywna piaskowców grubo- i średnioziarnistych osiąga do 14–17% (Bujakowska i in. 1991). Otwór Skierniewice GT-2 (głębokość końcowa 2900 m) został odwiercony w latach 1996–1997. Poziom wód geotermalnych znajduje się w głębokości 2771–2886 m (rys. 2). Są to warstwy kłodawskie górne (lias dolny – hettang) o analogicznej litologii jak w otworze Skierniewice GT-1. Piaskowce stanowią 60% profilu. Ich porowatość efektywna wynosi 7–14%, natomiast przepuszczalność 1–180 mD. W niższej części zmienność litologiczna jest również znaczna, występują przy tym pakiety piaskowców gruboziarnistych, słabo zwięzłych o najlepszych właściwościach kolektorskich, które jednak mają niewielką miąższość (3–7 m). Obecne są mikroszczeliny. Porowatość wynosi 11–18%, natomiast przepuszczalność 38–6800 mD, przy czym wysokie wartości (1200–6800 mD) oznaczono dla piaskowców grubo- i średnioziarnistych, niekiedy rozsypliwych (Bentkowski i in. 1998).

użycia cieczy kwasującej na produkty korozji orurowania i innych metalowych elementów instalacji, na substancje wtórnie wytrącane z wody geotermalnej, a także na strefę przyodwiertową i skały zbiornikowe – chłonne (piaskowce) oraz skały towarzyszące (mułowce,



Rys. 2. Uproszczony profil litostratygraficzny i schemat zarurowania otworów Skierniewice GT-1 i Skierniewice GT-2 na podstawie Bujakowska i in. 1991, Bentkowski i in. 1998, [W:] Kępińska, Bujakowski [red. nauk.] i in. 2011

Fig. 2. Simplified stratigraphic profile and construction scheme of holes Skierniewice GT-1 and Skierniewice GT-2 based on Bujakowska et al. 1991; Bentkowski et al. 1998



Rys. 3. Widok głowicy otworu Skierniewice GT-2
 a – stan przed adaptacją, b – w czasie wstępnych badań, c – w trakcie miękkiego kwasowania
 fot. B. Bielec

Fig. 3. View of the well Skierniewice GT-1
 a – state before adaptation, b – during the initial research, c – during soft acidizing
 photo by B. Bielec

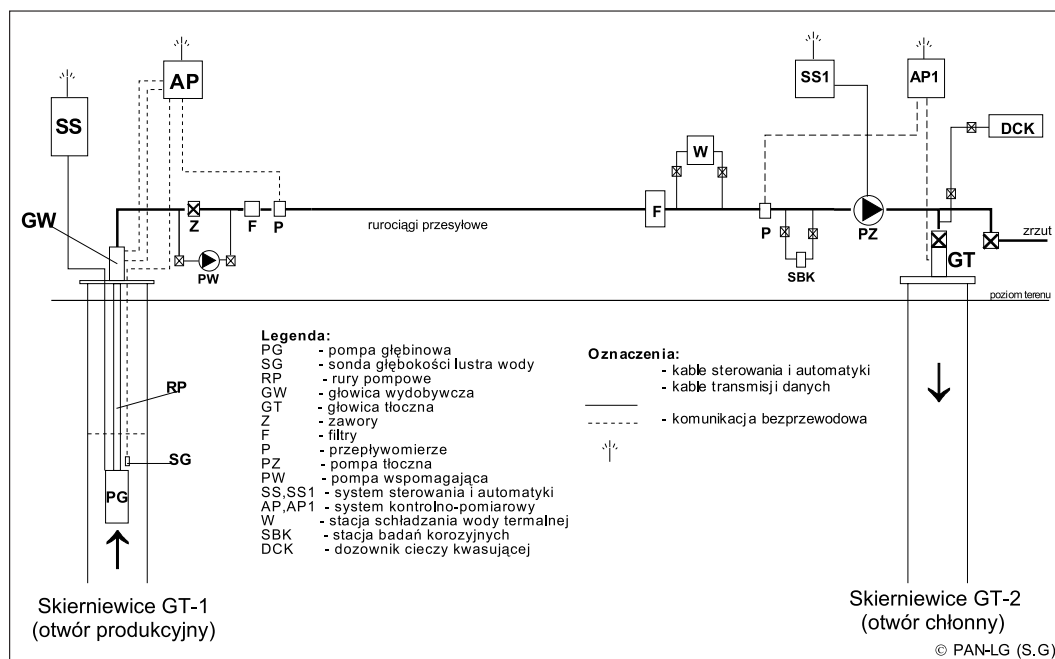
iłowce). Ciecz kwasującą stanowiła mieszanina wody geotermalnej z otworu Skierniewice GT-1, kwasu i inhibitora. Parametry cieczy kwasującej, tj. rodzaj kwasu i jego stężenie, typ dodawanego inhibitora korozji oraz czas miękkiego kwasowania określono wstępnie korzystając z doświadczeń innych pracujących instalacji geotermalnych w Europie i w kraju. Brano pod uwagę przede wszystkim te instalacje, które funkcjonują w podobnych warunkach jak system w Skierniewicach. Wykorzystano szereg opracowań dotyczących tematyki miękkiego kwasowania (m.in. Ventre, Ungemach 1998; Seibt i in. 2005; Stanasel i in. 2005; Bujakowski i in. 2008; Biernat i in. 2009; Ungemach 2010a, b; Biernat i in. 2010; Wolfgramm, Seibt 2008). Wspomniane testy laboratoryjne wykonano w Laboratorium PETROGEO PULiG Sp. z o.o. w Wołominie – Oddział w Jaśle (Śmist i in. 2011) na

kilkunastu próbek piaskowców z rdzeni pobranych z otworu Skierniewice GT-1 oraz piaskowców, mułowców i iłowców z otworu Skierniewice GT-2. W badaniach wykorzystano również próbki produktów korozji rur okładzinowych i wytrącania substancji wtórnych. Inhibitor korozji dobrany został na podstawie odrębnych testów (Kępińska, Bujakowski [red. nauk.] i in. 2011). W warunkach laboratoryjnych mieszano ze sobą określoną ilość cieczy kwasującej o podanym powyżej składzie i ustalonym stężeniu z określoną objętością wody geotermalnej, uzyskując w efekcie końcowe jej zakwaszenie na poziomie pH między 2 a 3. Taki odczyn jest stosowany w większości instalacji poddawanych zabiegom miękkiego kwasowania i wybrany został także dla przypadku Skierniewic.

Rodzaj kwasu i dodatków (inhibitora korozji) dobrano głównie pod kątem usuwania i ograniczania uszkodzeń otworów i strefy przyodwiertowej (powodowanych przez produkty korozji i wtórnego wytrącania), natomiast nie oczekiwano istotnych zmian w obrębie skał zbiornikowych, zwłaszcza że przeważającym ich składnikiem jest kwarc, podatny na inny rodzaj kwasu niż zastosowany w przypadku otworów w Skierniewicach.

3. Instalacja testowa

W celu przeprowadzenia testów miękkiego kwasowania w otworze Skierniewice GT-2 zaprojektowano i wykonano instalację wydobywczo-zatłaczającą według schematu pokazanego na rysunku 4.

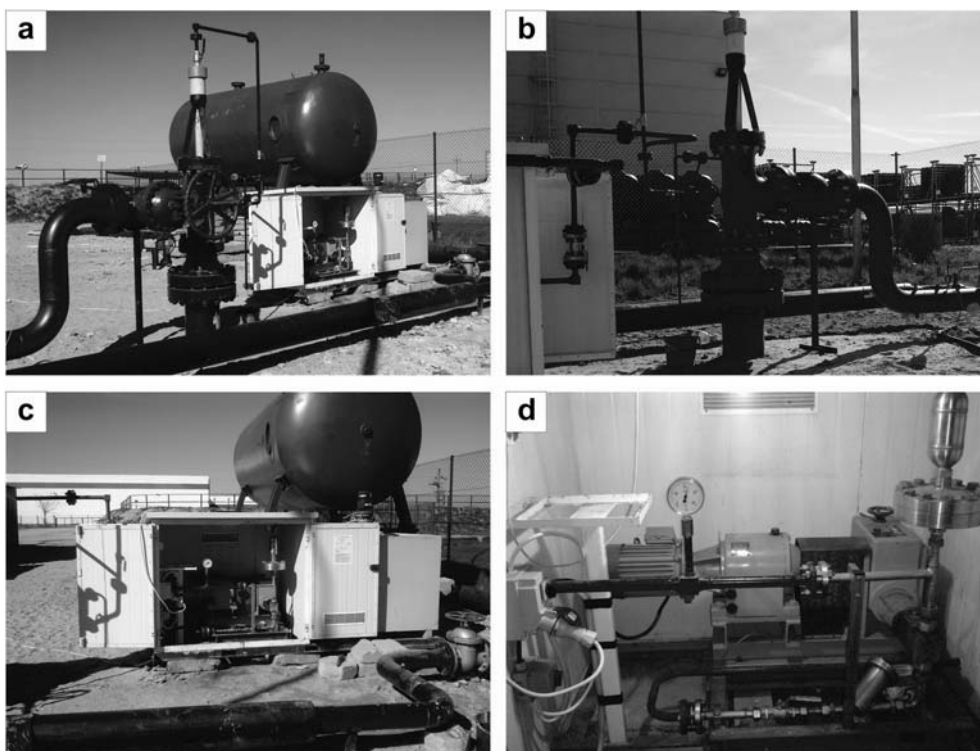


Rys. 4. Schemat układu badawczego Skierniewice GT-1 – Skierniewice GT-2 zestawionego w celu wykonania testów miękkiego kwasowania ([W:] Kępińska, Bujakowski [red. nauk.] i in. 2011)

Fig. 4. Diagram of research system Skierniewice GT-1 – Skierniewice GT-2 made for testing soft acidizing

W wyniku wcześniej przeprowadzonych badań (m.in. hydrogeologicznych i geofizycznych) oraz oceny stanu technicznego otworów, wytypowano do testów miękkiego kwasowania otwór Skierniewice GT-2. Otwory wyposażone zostały w odpowiednie głowice (wydobywczą i tłoczną) oraz aparaturę sterującą i kontrolno-pomiarową. W otworze Skierniewice GT-1 jako wydobywczym zamontowano pompę głębinową. Wspomagająco, przed głowicą tłoczną otworu GT-2 (rys. 5a, b), zainstalowana została pompa obiegowa ssąco-tłocząca (rys. 6b), która miała za zadanie wspomóc proces zatłaczania w przypadku wzrostu ciśnienia tłoczenia. Na rurociągu zamontowano separator fazy stałej – filtr workowo-magnetyczny – (rys. 6a). Konstrukcja głowicy tłocznej otworu Skierniewice GT-2 umożliwiała podłączenia aparatury służącej do dozowania cieczy kwasującej (rys. 5c, d) wykorzystywanej w testach miękkiego kwasowania.

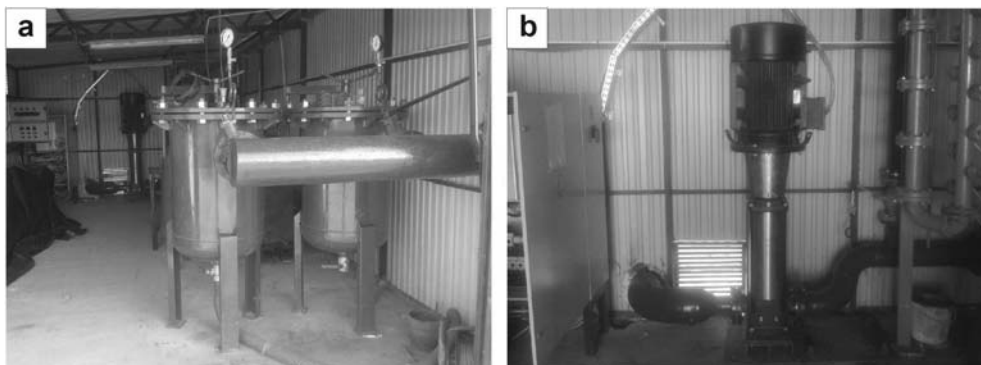
Od marca do sierpnia 2011 r. wykonano łącznie osiem testów miękkiego kwasowania. Sześć z nich (I–VI) przeprowadzono przy użyciu przewodu *coiled tubing* (CT), którym ciecz kwasująca podawana była bezpośrednio nad strefę złożową na głębokość 2765 m. Dwa testy (VII i VIII) polegały na podawaniu cieczy kwasującej bezpośrednio do obiegu wody



Rys. 5. Instalacja systemu geotermalnego Skierniewice GT-1 – Skierniewice GT-2
a, b – uzbrojenie głowicy otworu Skierniewice GT-2, c, d – aparatura do dozowania cieczy kwasującej (fot. B. Bielec)

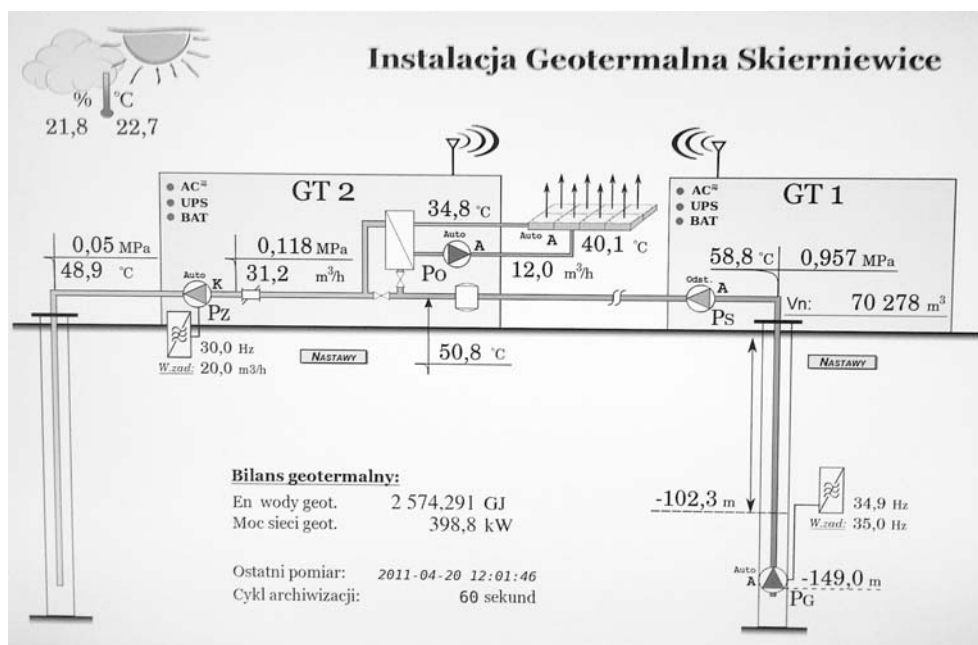
Fig. 5. Geothermal system Skierniewice GT-1 – Skierniewice GT-2
a, b – armament wellhead Skierniewice GT-2 well, c, d – apparatus for dosing acid liquid (photo by B. Bielec)

geotermalnej na głowicy otworu Skierniewice GT-2. Do dozowania ciecży użyto specjalnego zestawu dozującego, składającego się ze zbiornika na ciecż kwasującą oraz pompy dozującej – pompy tłokowej z nurnikiem ceramicznym (rys. 6c, d). Pompa umożliwiła



Rys. 6. Instalacja systemu geotermalnego Skierniewice GT-1 – Skierniewice GT-2
a – filtr workowo-magnetyczny, b – pompa obiegowa (fot. B. Bielec)

Fig. 6. Geothermal system Skierniewice GT-1 – Skierniewice GT-2
a – magnetic-bag filter, b – booster pump (photo by B. Bielec)



Rys. 7. Chwilowy obraz panelu sterowania i pomiaru parametrów systemu geotermalnego Skierniewice GT-1 – Skierniewice GT-2 ([W:] Kępińska, Bujakowski [red. nauk.] i in. 2011)

Fig. 7. Snapshot control panel and measurement of parameters of geothermal system Skierniewice GT-1 – Skierniewice GT-2

dozowanie cieczy kwasującej z wydajnością od 6 do 600 dm³/min przy maksymalnym ciśnieniu roboczym 6,0 MPa. Zbiornik na ciecz o pojemności 1000 dm³ był wyposażony w mieszadło do przygotowania mieszaniny kwasu, inhibitora korozji oraz wody geotermalnej. Całość, wraz z elementami hydraulicznymi (zawory kulowe, filtr, instalacja wewnętrzna), wykonano ze stali kwasoodpornej. Skład i proporcje cieczy kwasującej były zgodne z dobranymi w warunkach laboratoryjnych. Każdorazowo przygotowywano 1000 dm³ cieczy kwasującej. Przygotowana mieszanina „standardowa” służyła (przy odpowiedniej wydajności dozowania) do osiągnięcia odczynu pH = 2 wody geotermalnej (cieczy stymulującej) zatłaczanej do strefy złożowej. Podczas dwóch testów (V i VI) zastosowano zmodyfikowany skład cieczy kwasującej w stosunku do mieszaniny „standardowej”.

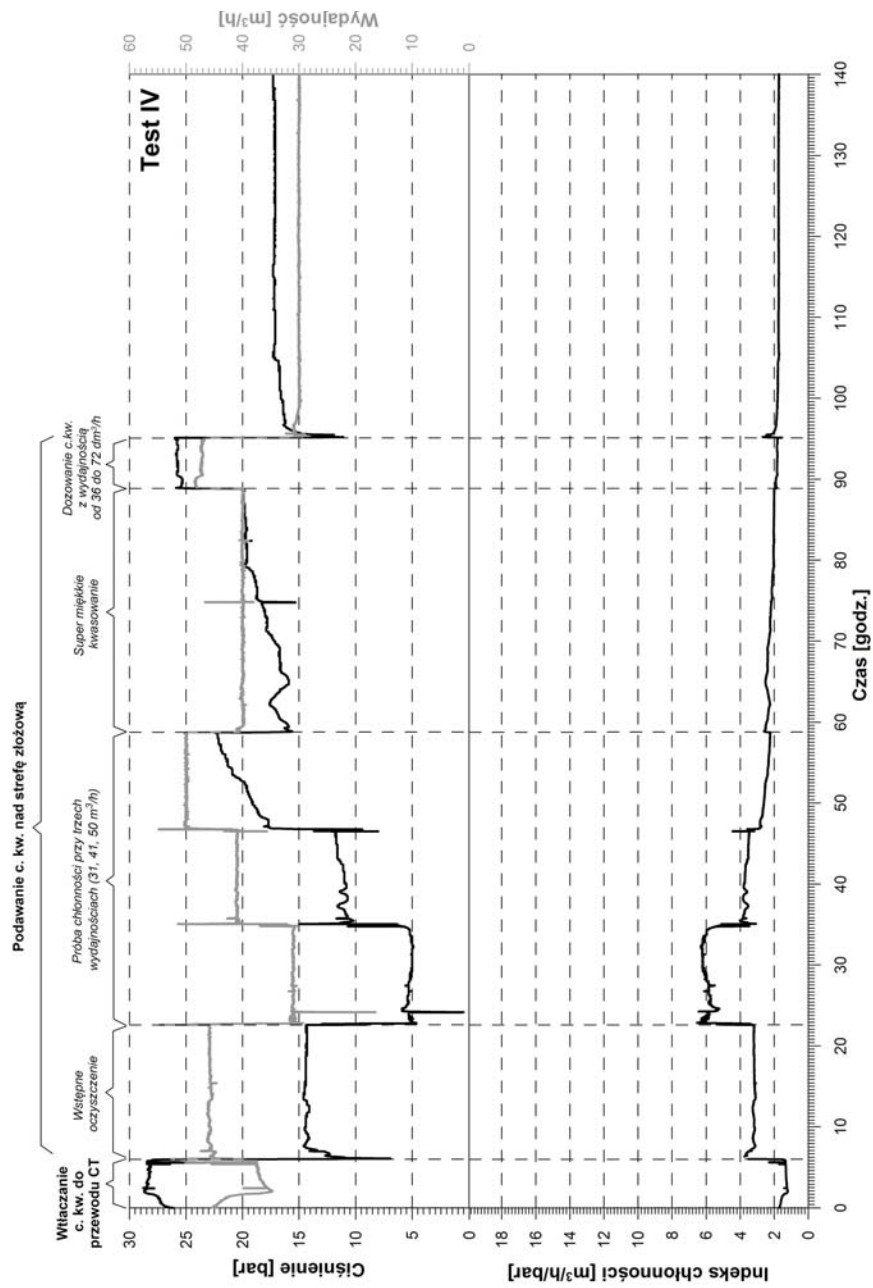
W trakcie wykonywania testów dokonywano szeregu pomiarów parametrów zatłaczania. Pomiary realizowane były przy użyciu odpowiednich czujników rozmieszczonych w różnych miejscach instalacji wydobywczo-zatłaczającej. Dane pomiarowe archiwizowane były automatycznie na dysku komputera i dostępne *on line* poprzez sieć internetową. Pomiarami objęto m.in.: wydajność zatłaczania, temperaturę wody geotermalnej i ciśnienia na głowicach otworów Skierniewice GT-1 i Skierniewice GT-2, a także położenie zwierciadła wody w otworze GT-1. Pracą pomp (głębiny i obiegowej) sterowały falowniki. Wszelkich nastaw można było dokonywać zdalnie poprzez panel sterowania (rys. 7).

4. Przebieg testów

Testy rozpoczęto od podawania cieczy kwasującej przez przewód CT zapuszczony nad strefę złożową na głębokość 2765 m. Ciecz kwasująca podawana była do zatłaczanej wody geotermalnej za pomocą aparatury dozującej. W ten sposób przeprowadzono sześć testów (I–VI). W czterech z nich zastosowano standardowy skład cieczy kwasującej zaś w dwóch nieco zmodyfikowany. W trakcie poszczególnych testów zmieniano wydajność zatłaczania wody geotermalnej i dobierano do niej wydatek dozowania cieczy kwasującej, w celu uzyskania odpowiedniego odczynu pH w strefie złożowej. Różny był także czas obserwacji parametrów eksploatacyjnych.

Po zakończeniu pierwszej serii testów wyciągnięto z otworu Skierniewice GT-2 przewód CT do głębokości 350 m i wykonano krótkie pompowanie oczyszczające otworu metodą airliftu. Celem tego zabiegu było usunięcie z otworu materiału, który mógł się nagromadzić w filtrze po przeprowadzonej serii badań. Po zakończeniu pompowania usunięto z otworu przewód CT. Wypompowano łącznie około 330 m³ wody geotermalnej, w tym około 20 m³ zanieczyszczonej wody pochodzącej ze strefy złożowej. Kolejne dwa testy (VII i VIII) wykonano podając ciecz kwasującą bezpośrednio do obiegu wody geotermalnej na głowicy otworu Skierniewice GT-2. W tej serii testów stosowano standardowy skład cieczy kwasującej. Podobnie jak w pierwszej serii testów zmianie ulegała wydajność zatłaczania wody geotermalnej oraz wydatek dozowania cieczy kwasującej.

W niniejszej pracy opisano szerzej tylko jeden z wybranych testów – test IV. Szczegółowy opis wszystkich badań można znaleźć w pracach Bujakowskiego i in. (2011) oraz Kępińskiej, Bujakowskiego [red.nauk.] i in. (2011). Test IV polegał na wtłoczeniu ogółem 2000 dm³ cieczy kwasującej (o standardowych proporcjach). W trakcie tego testu wykonano próbę chłonności przy trzech wydajnościach zatłaczania (31, 41 i 50 m³/h). Dalsza część



Rys. 8. Zmienność parametrów hydrodynamicznych w trakcie testu IV miękkiego kwasowania otworu Skiermiewice GT-2
 ([W:] Kępińska, Bujakowski [red. nauk.] i in. 2011)

Fig. 8. The variability of hydrodynamic parameters during the test IV soft acidizing Skiermiewice GT-2 well

testu to tzw. „super miękkie kwasowanie” przy pH około 2,8 w strefie złożowej. I wreszcie ostatnia część, to podawanie cieczy kwasującej ze wzrastającą wydajnością dozowania. Po sześciu godzinach od rozpoczęcia testu zaobserwowano raptowny spadek ciśnienia zatłaczania od 2,85 MPa do 0,69 MPa, a następnie w ciągu dwóch godzin ciśnienie ponownie wzrosło do około 1,45 MPa i utrzymywało się na takim poziomie do końca pierwszej części testu, tj. do zakończenia podawania 500 dm³ cieczy kwasującej przy wydatku 45 m³/h. Następnie obniżono wydajność zatłaczania do 31 m³/h i dostosowano do niej dozowanie cieczy kwasującej. W tym czasie ciśnienie utrzymywało się na poziomie 0,5 MPa. Po 12 godzinach podniesiono wydajność zatłaczania wody geotermalnej do 41 m³/h i ponownie dostosowano do niej wydajność dozowania cieczy kwasującej. Ciśnienie podniosło się do około 1,15 MPa i praktycznie do końca tej części testu było stabilne. Po kolejnych 12 godzinach ponownie podniesiono wydajność zatłaczania, tym razem do 50 m³/h. Także w tym przypadku dostosowano do tej wydajności wielkość dozowania cieczy kwasującej. Po zmianie wydajności zatłaczania ciśnienie raptownie wzrosło do około 1,75 MPa i do końca tej części testu (w ciągu 12 godzin) wzrastało systematycznie do 2,22 MPa. Kolejna część testu, umownie nazwana „super miękkim kwasowaniem”, polegała na podawaniu przez 30 godzin cieczy kwasującej ze zmniejszoną wydajnością dozowania, pozwalającą na osiągnięcie pH w strefie złożowej na poziomie około 2,8. W tym czasie wydajność zatłaczania wody geotermalnej obniżono do 40 m³/h. Po zmianie wydajności ciśnienie obniżyło się do około 1,6 MPa i w ciągu 30 godzin podniosło się do 2,0 MPa. Ostatnia faza testu to podawanie cieczy kwasującej ze zwiększającą się wydajnością dozowania (od 36 do 72 dm³/h) przy wydatku tłoczenia na poziomie 48 m³/h. Przy takich proporcjach cieczy kwasującej w stosunku do wody geotermalnej osiągnano w złożu pH < 2. W ciągu pierwszych dwóch godzin podawano ciecz kwasującą z wydajnością 36 dm³/h. Następnie przez kolejne dwie godziny z wydatkiem 48 dm³/h, dalej przez jedną godzinę z wydatkiem 60 dm³/h i przez jedną godzinę z wydatkiem 72 dm³/h. W tym czasie ciśnienie nieznacznie wzrosło od 2,55 do 2,60 MPa. Po zakończeniu wytłaczania cieczy kwasującej z przewodu CT ustalono wydajność zatłaczania wody geotermalnej na 30 m³/h i rozpoczęto obserwacje ciśnienia. Tuż po obniżeniu wydajności z 48 do 30 m³/h ciśnienie spadło do 1,1 MPa po czym w ciągu 1,5 godziny ponownie wzrosło do 1,65 MPa. Pod koniec okresu obserwacji (4 doby) wzrosło do 1,8 MPa. Rysunek 8 pokazuje zmienność ciśnienia, wydatku i indeksu chłonności w trakcie testu IV.

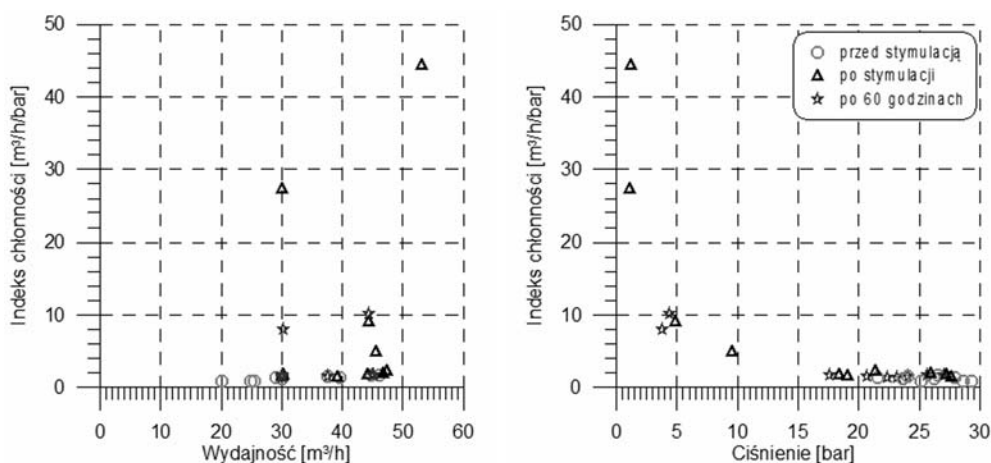
Początkowy spadek ciśnienia spowodowany był działaniem cieczy kwasującej na produkty korozji i wtórnego wytrącania zgromadzone na filtrze i w strefie okołofiltrowej. Z przeprowadzonego testu można wstępnie wnioskować, że do wydajności zatłaczania około 40 m³/h podawana ciecz kwasująca była w stanie jeszcze rozpuścić produkty wytrącania odkładające się na filtrze i w strefie przyfiltrowej na tyle, by nie powodowały one „zatykania” tej strefy. Podwyższenie pH do około 2,8 powodowało już wzrost ciśnienia mimo obniżenia wydajności do 40 m³/h. Z kolei obniżenie pH < 2 przy zwiększonej wydajności do 48 m³/h nie hamowało całkowicie wzrostu ciśnienia, a jedynie ograniczało nieco jego wzrost w trakcie zatłaczania. Wraz z zakończeniem podawania cieczy kwasującej zanotowano ponowny, systematyczny wzrost ciśnienia. Skala tego wzrostu wydaje się jednak mniejsza niż przy poprzednich testach, co mogło być wynikiem użycia zdecydowanie większej ilości cieczy kwasującej.

5. Wyniki badań

Z przeprowadzonych badań, analiz i interpretacji ich rezultatów wynika, że do głównych przyczyn spadku chłonności strefy przyodwiertowej i skał zbiornikowych Skierniewice GT-2 należały zjawiska korozji i wytrącania wtórnych substancji mineralnych. Ich produktami są tlenki, wodorotlenki i siarczki żelaza (korozja), a także wtórny aragonit i kalcyt, prowadzące do uszkodzeń chłonności strefy okołofiltrowej i skał zbiornikowych.

Procesy te zależne są m.in. od wydatku i czasu zatłaczania wody geotermalnej. Ciśnienie rosło w znacznie większym tempie w przypadku tłoczenia z dużą wydajnością: w ciągu 120 h od zaprzestania podawania cieczy kwasującej do wody geotermalnej indeks chłonności w teście II obniżył się z 25 do 8 m³/h/bar. Wydajność zatłaczania wynosiła wówczas 30 m³/h. Natomiast w teście IV, pomimo użycia dwukrotnie większej ilości cieczy kwasującej, indeks chłonności po zaprzestaniu jej podawania wynosił już tylko około 2 m³/h/bar przy tej samej wydajności zatłaczania. W trakcie trwania testu IV wydajność zatłaczania była jednak zdecydowanie wyższa (40–50 m³/h), co prawdopodobnie przyczyniło się do przyspieszenia procesu wtórnego wytrącania. Dodatkowo większa prędkość przepływu wody w rurach okładzinowych (pokrytych zapewne produktami wytrącania i korozji) powoduje wzrost oporów przepływu skutkujący wzrostem ciśnienia zatłaczania. Najmniejsze zmiany indeksu chłonności zaobserwowano w trakcie testu VII (podawanie cieczy kwasującej do obiegu). Przed rozpoczęciem testu był on na poziomie 1,15 m³/h/bar. Zaraz po zaprzestaniu podawania cieczy kwasującej wynosił 1,64 m³/h/bar, aby na zakończenie okresu obserwacji, tj. po 80 godzinach, osiągnąć wartość 1,28 m³/h/bar.

Niewielka zmiana indeksu spowodowana była zmniejszoną reaktywnością cieczy kwasującej, która nim dotarła do strefy złożowej weszła w reakcję z produktami korozji i wtórnego wytrącania zdeponowanymi na rurach okładzinowych. Na rysunku 9 pokazana została



Rys. 9. Zależność indeksu chłonności od wydajności i ciśnienia zatłaczania w różnych fazach testów miękkiego kwasowania

Fig. 9. Dependence of injectivity index of the pressure and flow rate in different phases of testing soft acidizing

zależność indeksu chłonności od wydajności i ciśnienia zatłaczania w różnych fazach poszczególnych testów. Wzięto pod uwagę indeks chłonności przed rozpoczęciem kwasowania, tuż po zaprzestaniu podawania cieczy kwasującej oraz po 60 godzinach obserwacji.

Widoczna jest zależność indeksu chłonności od ciśnienia zatłaczania. Małe wartości indeksów przy dużych ciśnieniach charakteryzują okres przed stymulacją. Duże wartości indeksów przy niskim ciśnieniu są charakterystyczne dla okresu tuż po stymulacji. Maksymalna wartość indeksu chłonności po 60 godzinach od zaprzestania podawania cieczy kwasującej nie przekracza $10 \text{ m}^3/\text{h}/\text{bar}$, osiągając średnią wartość około $2 \text{ m}^3/\text{h}/\text{bar}$. W przypadku wydajności mamy do czynienia z odwrotną zależnością. Niski indeks chłonności przy małej wydajności obserwowano przed stymulacją, natomiast po stymulacji wyższy indeks osiągany był przy większych wydajnościach zatłaczania.

Wnioski

Zabiegi miękkiego kwasowania z zastosowaniem cieczy kwasującej, o podanym „standardowym” składzie, oddziaływały przede wszystkim na produkty korozji i wtórnego wytrącania osadzone na filtrze i w strefie okołofiltrowej (testy z użyciem CT) oraz dodatkowo w rurach okładzinowych (testy bez CT). W przypadku użycia większej ilości cieczy kwasującej penetrowała ona również złożę w większej odległości od osi otworu i rozpuszczała wtórne substancje mineralne, które przeniknęły wraz z zatłaczaną wodą geotermalną do skał zbiornikowych (po zaprzestaniu podawania cieczy kwasującej mogły one ponownie wytrącać się w obrębie skał zbiornikowych). Przeprowadzone zabiegi wpływały krótkookresowo na zmniejszanie oporów przepływu zatłaczanej wody geotermalnej w rurach wiertniczych, wzrost przepuszczalności strefy przyodwiertowej i skał zbiornikowych. W efekcie zwiększała się chłonność odwiertu i obniżało ciśnienie zatłaczania. Zakwaszona woda nie oddziaływała natomiast na piaskowce kwarcowe budujące zasadniczą część skał zbiornikowych. Z analizy poziomu i zmienności parametrów hydrodynamicznych wynika, że zabiegi stymulacji metodą miękkiego kwasowania udrażniały w pewnym zakresie odwiert chłonny Skierniewice GT-2 i strefę przyodwiertową, powodując wzrost chłonności. Ich efekty były jednak mniejsze i mniej trwałe niż efekty wywołane ciągłą korozją orurowania odwiertu i wtórnym wytrącaniem substancji mineralnych z wody geotermalnej, która w przypadku otworów Skierniewice GT-1i Skierniewice GT-2 ma wysoką mineralizację, około $110 \text{ g}/\text{dm}^3$.

Literatura

- Bentkowski i in. 1998 – Bentkowski A., Biernat H., Bujakowska K., Kapuściński J., 1998 – Dokumentacja hydrogeologiczna zasobów eksploatacyjnych wód termalnych z utworów jury dolnej w Skierniewicach. Arch. CAG, Warszawa.
- Biernat i in. 2009 – Biernat H., Kulik S., Noga B., 2009 – Możliwości pozyskiwania energii odnawialnej i problemy związane z eksploatacją ciepłowni geotermalnych wykorzystujących wody termalne z kolektorów porowych. Przegl. Geol. t. 57, nr 8.
- Biernat i in. 2010 – Biernat H., Kulik S., Noga B., Kosma Z., 2010 – Problemy inkrustacji przy zatłaczaniu wykorzystanych wód termalnych. Modelowanie inżynierskie 39. Gliwice.

- Bujakowska i in. 1991 – Bujakowska K., Biernat H., Jaworska I., 1991 – Dokumentacja wynikowa geologiczno-hydrogeologiczna otworu Skierniewice GT-1. Cz. 1. Arch. CAG, Warszawa.
- Bujakowski i in. 2011 – Bujakowski W., Balcer M., Banaś J., Barbacki A., Bielec B., Dąbek B., Górecki W., Graczyk S., Hołojuch G., Kasztelewicz A., Kępińska, B., Miecznik M., Pająk L., Tomaszewska B., 2011 – Dokumentacja geologiczna dotycząca opracowania wytycznych projektowych poprawy chłonności skał zbiornikowych w związku z zatłaczaniem wód termalnych w polskich zakładach geotermalnych. Arch. CAG, Warszawa.
- Bujakowski i in. 2008 – Bujakowski W., Graczyk S., Hołojuch G., Kępińska B., Tomaszewska B., Wartak W., Kurpik J., Barbacki P., Pająk L., 2008 – Dokumentacja wynikowa z realizacji Projektu Celowego Nr 6T12 2003 C.6005 „Stymulacja otworów geotermalnych zmodyfikowaną metodą „miękkiego kwasowania” („soft acidizing”). Arch. IGSMiE PAN, Kraków.
- Kępińska, Bujakowski [red. nauk.] i in. 2011 – Kępińska B. [red. nauk.], Bujakowski W. [red.nauk.], Bielec B., Tomaszewska B., Banaś J., Solarski W., Mazurkiewicz B., Pawlikowski M., Pająk L., Miecznik M., Balcer M., Hołojuch G., 2011 – Wytyczne projektowe poprawy chłonności skał zbiornikowych w związku z zatłaczaniem wód termalnych w polskich zakładach geotermalnych. Wydawnictwo EJB, Kraków, s. 236.
- Parecki A., Biernat H., 2007 – Próba rozwiązania problemów towarzyszących eksploatacji ciepłowni geotermalnych wykorzystujących wody termalne z kolektorów porowych. Technika Poszukiwań Geologicznych. Geotermia. Zrównoważony Rozwój nr 2/2007. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- Seibt i in. 2005 – Seibt P., Kabus F., Hoth P., 2005 – The Neustadt – Glewe Geothermal Plant – practical experience in the reinjection of cooled thermal waters into sandstone aquifers. Proceedings, World Geothermal Congress 2005. Antalya, Turkey. Paper no. 1209 (CD).
- Śmist i in. 2011 – Śmist P., Wielgosz K., Kopczyński R., Kocik D., 2011 – Badanie wpływu cieczy kwasującej na własności skał strefy chłonnej odwiertów Skierniewice GT-1 i Skierniewice GT-2. Laboratorium PETROGEO PULiG Sp. z o.o. w Wołominie – Oddział w Jaśle. Raport nr LJ/3123/P/04/11. Arch. Geotermia Mazowiecka S.A.
- Stanasel O., Stanasel I., 2005 – Corrosion tests and the use of inhibitors in low temperature geothermal waters. Proceedings, World Geothermal Congress 2005. Antalya, Turkey. Paper no. 2031 (CD).
- Ungemach P., 2004 – Technologia i problemy w zarządzaniu zasobami geotermalnymi. Materiały konferencji „Międzynarodowe Dni Geotermalne Polska 2004”. Wyd. IGSMiE PAN. Kraków.
- Ungemach P., 2010a – Water injection. [W:] WGC2010 Pre-Congress Short Course on Drilling, completion and testing of geothermal wells. Course material (CD). WGC 2010 Organising Committee Eds.
- Ungemach P., 2010b – Corrosion/Scaling abatement. [W:] WGC2010 Pre-Congress Short Course on Drilling, completion and testing of geothermal wells. Course material (CD). World Geothermal Congress Bali, Indonesia 2010 (CD).
- Ungemach, P., Ventre, A.V., 1996 – Soft acidizing. A cost effective stimulation technique of damaged geothermal wells. Proceedings of the 23rd Hungarian Petroleum Conference Tihany (Hungary).
- Ventre A. V., Ungemach P., 1998 – Soft acidizing of damaged geothermal injection wells. Discussion of results achieved in the Paris Basin. Proceedings of the Twenty-Third Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, Stanford, California, January 26–28. 1998.
- Wolfgramm M., Seibt A., 2008 – Zusammensetzung von Tiefenwässern in Deutschland und ihre Relevanz für geothermische Anlagen. GtV-Tagung in Karlsruhe 2008. Proceedings.

