

Problemy rekonstrukcji odwiertów geotermalnych

Problems of geothermal wells workover operations



*Dr hab. inż. Barbara Uliasz-Misiak**



*Prof. dr hab. inż. Stanisław Dubiel**

Treść: Nakłady inwestycyjne ponoszone na budowę instalacji geotermalnej kształtują przede wszystkim koszty wykonania głębokich odwiertów geotermalnych, przy mniejszym udziale kosztów elementów instalacji na powierzchni terenu. Wykorzystanie odwiertów wykonanych w innych celach jako geotermalne lub realizacja prac przedłużających czas życia odwiertów może znacząco wpłynąć na rentowność pozyskiwania energii geotermalnej. Prace rekonstrukcyjne wykonywane w odwiertach geotermalnych mają na celu utrzymanie odpowiednio dużego wydobycia wody termalnej, chłonności lub zaadaptowanie otworów wykonanych do innych celów jako odwierty geotermalne. W zależności od celu rekonstrukcji odwiertów geotermalnych zaproponowano następujące scenariusze prac: adaptację odwiertów poszukiwawczych dla potrzeb geotermii, naprawę stanu technicznego odwiertu, udrożnienie strefy przyodwiertowej oraz instalacja wyposażenia wgłębnego w przypadkach zmiany funkcji odwiertu. Analiza przemysłowych przykładów rekonstrukcji odwiertów geotermalnych umożliwia lepszy dobór prac koniecznych do wykonania oraz rezygnację z robót zbędnych. Pozwala to na skrócenie czasu rekonstrukcji oraz obniżenie kosztów jej wykonania. Rekonstrukcja odwiertu Mszczonów IG-1 jest dobrym przykładem prac adaptacyjnych, zwłaszcza w zakresie technik udrażniania odwiertu oraz usuwania występujących komplikacji wiertniczych. Prace wykonane w odwiercie Biały Dunajec PAN-1 wskazują, że poprawę stanu technicznego starych odwiertów można szybko i skutecznie uzyskać poprzez zapuszczenie nowej kolumny eksploatacyjnej rur okładzinowych o mniejszej średnicy.

Abstract: Geothermal installation investment expenditures are shaped mainly by the costs of constructing deep geothermal wells, cost of the surface installations is significantly lower. Adapting of wells drilled for other purposes or implementing the works extending wells lifespan may considerably influence the return rate of the geothermal installations. The purpose for reconstruction works carried out in geothermal wells is to maintain sufficient thermal water discharge, absorption capacity or adapting the boreholes made for other purposes as geothermal wells. Industrial analysis examples of the workover operations of geothermal wells enables a better selection of necessary works. This allows to shorten the time and reduce the cost of the reconstruction. Workover operations on the Mszczonów IG-1 well are a good example of adaptation, especially clearing and removal of existing borehole drilling complications techniques. The work done in the Biały Dunajec PAN-1 well indicates that the improvement of the technical condition of old wells can be quickly and efficiently accomplished by putting down a new casing of smaller diameter.

Słowa kluczowe:

odwierty geotermalne, rekonstrukcja odwiertu, stan techniczny odwiertu, stymulacja odwiertu geotermalnego

Key words:

geothermal wells, well workover, technical conditions of the well, geothermal well stimulation

1. Wprowadzenie

Produkcja energii elektrycznej i ciepłej w Polsce oparta jest na kopalnych źródłach energii to jest węgla kamiennym i brunatnym. Wyczerpywanie się zasobów tych kopalni, aspekty środowiskowe oraz konieczność dostosowania się

do umów międzynarodowych powodują, że rośnie zainteresowanie odnawialnymi źródłami energii (OZE). Odnawialne źródło energii zgodnie z ustawą Prawo energetyczne (Dz. U. 1997 Nr 54 poz. 348 z późn. zm.) to źródło wykorzystujące w procesie przetwarzania między innymi energię geotermalną.

Rozwój odnawialnych źródeł energii jest jednym z podstawowych kierunków polskiej polityki energetycznej (Polityka Energetyczna Polski do 2030 roku). Wzrost udziału odnawial-

* AGH w Krakowie

nych źródeł energii w finalnym zużyciu energii przewidziano co najmniej do poziomu 15 % w 2020 roku oraz dalszy wzrost tego wskaźnika w kolejnych latach. Cele te są zgodne z celami Unii Europejskiej (Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych zmieniającej i w następstwie uchylającej dyrektywy 2001/77/WE oraz 2003/30/WE) oraz zobowiązaniami wynikającymi m.in. z pakietu klimatycznego.

W Polsce ze wszystkich odnawialnych źródeł energii najwyższy potencjał techniczny ma energia geotermalna. Wykorzystanie tego źródła energii wiąże się z dużymi nakładami kapitałowymi. Koszt budowy instalacji geotermalnej kształtują w głównej mierze koszty wykonania głębokich odwiertów, przy mniejszym udziale kosztów elementów instalacji na powierzchni terenu. Nakłady poniesione na wykonanie odwiertów stanowią główną pozycję, początkowych nakładów kapitałowych. Szacuje się, że koszt dubletu odwiertów (produkcyjnego i chłonnego) to około 40÷60 % kosztu całości inwestycji geotermalnej [12].

W Polsce od 1945 roku do tej pory wykonano prawie 8 tysięcy odwiertów o głębokości większej niż 1000 m oraz 150 tysięcy odwiertów o głębokości do 500 metrów (<http://infolupki.pgi.gov.pl/pl/co-sie-wierci/baza-otworow-wiertniczych-wykonanych-w-polsce>). Wykorzystanie zrekonstruowanych, starych odwiertów parametryczno-strukturalnych, poszukiwawczych, rozpoznawczych lub eksploatacyjnych do pozyskiwania energii geotermalnej może znacząco obniżyć koszty budowy instalacji geotermalnych.

Na poprawę ekonomiki eksploatacji wód termalnych wpłynąć może również zrekonstruowanie odwiertów geotermalnych w celu poprawy efektywności wydobywania lub zatłaczania wód termalnych poprzez naprawę stanu technicznego odwiertu, udrożnienia strefy przyodwiertowej lub instalacji wyposażenia wgłębnego w przypadkach zmiany funkcji odwiertu.

2. Przegląd konstrukcji odwiertów geotermalnych w Polsce

Obecnie w Polsce działa 6 zakładów geotermalnych ciepłowniczych (Bańska-Zakopane, Pyrzyce, Mszczonów, Stargard Szczeciński, Uniejów, Poddebice), które pozyskują wodę termalną głębokimi odwiertami. Pięć zakładów pracuje w oparciu o dublety geotermalne wykonane specjalnie dla celów eksploatacji i zatłaczania wód termalnych. Zakład w Mszczonowie pracuje w systemie jednootworowym wykorzystując zrekonstruowany otwór parametryczny. Spośród 15 odwiertów wykorzystywanych przez zakłady geotermalne większość została wykonana specjalnie w tym celu, tylko 4 odwierty (Bańska IG-1, Biały Dunajec PAN-1, Mszczonów IG-1, Uniejów IGH-1) to odwierty stare.

Typowa konstrukcja odwiertów geotermalnych składa się z następujących elementów: kolumny wstępnej, kolumny przewodnikowej, kolumny technicznej oraz konstrukcji udostępnienia poziomu wód termalnych. Dobór sposobu udostępnienia poziomu geotermalnego zależy od wydatku wody lub wydatku zatłaczania, głębokości zalegania poziomów wód termalnych, przepuszczalności, porowatości oraz zwięzłości i uziarnienia skał wodonośnych, końcowej średnicy odwiertu, czasu użytkowania odwiertu oraz konstrukcji strefy zalegania poziomu geotermalnego. Stosowane są następujące konstrukcje udostępniania poziomów geotermalnych: konstrukcja bezfiltrowa, filtr, poszerzenie odwiertu w strefie złożowej w celu jego filtrowania (filtr z obsypką żwirową), perforacja rur okładzinowych [11].

Zakłady geotermalne eksploatują wody termalne z utworów klastycznych wieku jury dolnej i kredy dolnej na Niziu Polskim oraz z utworów węglanowych niecki podhalańskiej.

Spośród odwiertów pracujących w zakładach geotermalnych siedem ma poziom wód termalny udostępniony do eksploatacji lub zatłaczania w postaci rur perforowanych. Pięć w formie konstrukcji filtrowej z poszerzeniem odwiertu i obsypką żwirową, dwa odwierty w strefie złożowej są niezarurowane (tabl. 1).

Tablica 1. Rodzaje odwiertów i sposób udostępnienia poziomów wód termalnych w zakładach geotermalnych w Polsce
Table 1. Types of wells and a method for accessing the levels of geothermal waters in geothermal plants in Poland

Zakład geotermalny	Nazwa odwiertu	Trajektoria osi odwiertu	Rodzaj odwiertu	Sposób udostępnienia poziomu wód termalnych
Pyrzyce	Pyrzyce GT-1	pionowy	eksploatacyjny	poszerzony/ zaflirtowany
	Pyrzyce GT-2	pionowy	chłonny	poszerzony / nafilrtowany
	Pyrzyce GT-3	pionowy	eksploatacyjny	poszerzony / nafilrtowany
	Pyrzyce GT-4	pionowy	chłonny	poszerzony / nafilrtowany
Mazowiecka	Mszczonów GT-1	pionowy	eksploatacyjny	perforacja rur
Uniejów	Uniejów PIG/AGH-1	pionowy	chłonny	perforacja rur
	Uniejów PIG/AGH-2	pionowy	eksploatacyjny	perforacja rur
	Uniejów IGH-1	pionowy	chłonny	nafiltrowany
Stargard Szczeciński	Stargard Szczeciński GT-1	pionowy	eksploatacyjny	poszerzony / nafilrtowany
	Stargard Szczeciński GT-2	kierunkowy	chłonny	poszerzony / niezarurowany
Podhale	Bańska IG-1	pionowy	eksploatacyjny	perforacja rur
	Bańska PGP-1	pionowy	eksploatacyjny	perforacja rur/niezarurowany
	Bańska PGP-2	pionowy	eksploatacyjny	Niezarurowany
	Bańska PGP-3	kierunkowy	eksploatacyjny	perforacja rur
	Biały Dunajec PAN-1	pionowy	chłonny	perforacja rur
	Biały Dunajec PGP-2	pionowy	chłonny	perforacja rur

Część odwiertów eksploatacyjnych ma komory pompowe (Pyrzyce GT-1, 2, 3, 4 oraz Stargard Szczeciński GT-1), natomiast w odwiertach chłonnym, z wyjątkiem odwiertu Stargard Szczeciński GT-2, kolumny eksploatacyjne wyciągnięte są do wierzchu [4].

3. Analiza scenariuszy rekonstrukcji odwiertów geotermalnych

Rekonstrukcje odwiertów eksploatacyjnych w górnictwie naftowym i gazownictwie mają na celu przedłużenie czasu eksploatacji złoża lub zwiększenie wydobycia ropy i gazu, z równoczesnym staraniem o uzyskanie jak najwyższego stopnia szczypania zasobów węglowodorów. Może być to zrealizowane poprzez zastosowanie zabiegów stymulacyjnych, pogłębienie odwiertu, udostępnienie nowego poziomu produktywnego do eksploatacji, wymianę uszkodzonych rur okładzinowych oraz elementów wyposażenia wgłębnego [13]. W przypadku odwiertów geotermalnych prace rekonstrukcyjne związane są głównie z utrzymaniem odpowiednio dużego wydobycia wody termalnej, możliwością zatłaczania schłodzonej wody lub przystosowaniem starego otworu poszukiwawczego do celów eksploatacji wody termalnej.

W zależności od celu rekonstrukcji można zaproponować następujące scenariusze prac rekonstrukcyjnych w odwiertach geotermalnych:

1. Adaptacja odwiertów poszukiwawczych dla potrzeb geotermii,
2. Naprawa stanu technicznego odwiertu,
3. Udrożnienie strefy przyodwiertowej,
4. Instalacja wyposażenia wgłębnego w przypadkach zmiany funkcji odwiertu.

Spośród wymienionych najczęściej wykonywane są także prace związane z poprawą stanu technicznego odwiertu oraz udrażnianiem strefy przyodwiertowej.

3.1. Adaptacja odwiertów poszukiwawczych dla potrzeb geotermalnych

Głębokie odwierty, które były wykonywane w celu rozpoznania budowy geologicznej przy korzystnych warunkach geologiczno-złożowych mogą być wykorzystane do celów geotermalnych. Wykorzystanie ich jako odwiertów eksploatacyjnych lub zatłaczających wymaga przeprowadzenia prac rekonstrukcyjnych obejmujących zarówno prace badawcze, jak i prace techniczne. Stare odwierty np. poszukiwawcze mogą być również wykorzystywane jako wymienniki ciepła [9].

Zaadaptowanie starych odwiertów do innych celów, w tym geotermalnych wymaga w pierwszej kolejności przeprowadzenia kontroli stanu technicznego odwiertu: średnicy, jego drożności, występowania ewentualnych zasypów oraz szczelności kolumny rur okładzinowych i płaszcza cementowego. Bowiem warunkiem bezpiecznej i bezawaryjnej eksploatacji starych odwiertów jest ich dobry stan techniczny.

Ocenę stanu technicznego przeprowadza się w oparciu o badania geofizyczne, z zastosowaniem: średnicomierza, cementomierza akustycznego (CBL oraz PET), sondy magnetycznej (MTT), kawernomierza wieloramiennego (MIT), skanera akustycznego CAST i termometru. Cementomierz akustyczny umożliwia określenie jakości wiązania zaczynu cementowego z rurami i skałami, stopnia wypełnienia przestrzeni pozarurowej oraz wykrycie stref przepływu płynów poza rurami. Zaraz po cementowaniu taką rolę spełnia też profilowanie termiczne. Identyfikacja uszkodzeń rur okładzinowych możliwa jest na podstawie badań sondą magnetyczną lub skanerem akustycznym CAST. Badania stanu technicznego

wykonywane są przed przystąpieniem do prac rekonstrukcyjnych. Powinno się je powtórzyć po zakończeniu prac wiertniczych i adaptacyjnych.

Podczas adaptacji starych odwiertów do celów geotermalnych wykonywane są następujące prace wiertnicze:

- zwiercenie korków, wykonanych wcześniej w celu likwidacji odwiertu, zamykających poziomy wodonośne,
- wymiana uszkodzonych rur okładzinowych,
- szablonowanie odwiertu,
- frezowanie elementów rurowych i pakerowych oraz płukanie odwiertu,
- czyszczenie odwiertu z nagromadzonych osadów (między innymi z soli i rdzy),
- udostępnienie poziomu wód termalnych do eksploatacji lub do zatłaczania wód schłodzonych – wykonanie perforacji rur okładzinowych lub zafiltrowanie odwiertu (filtr wraz z obsypką piaskowo-żwirową).

Pierwszym odwiertem, który został zaadaptowany do celów geotermalnych był Mszczonów IG-1, który wykonano w latach 1976÷1977. Jego zadaniem było zbadanie zmienności fałdalnej dolomitu głównego na obszarze niecki warszawskiej. Przewiercono nim utwory mezozoiku, permu i karbonu, osiągając końcową głębokość 4119 metrów. Po zakończeniu wiercenia opróbowano poziomy perspektywiczne wieki: triasu środkowego i górnego, jury dolnej, środkowej i górnej oraz kredy dolnej. Przebadane poziomy charakterizowały się dobrymi właściwościami zbiornikowymi. Poziom dolnokredowy został wskazany jako najbardziej korzystny dla występowania wód termalnych w rejonie Mszczonowa [5, 6].

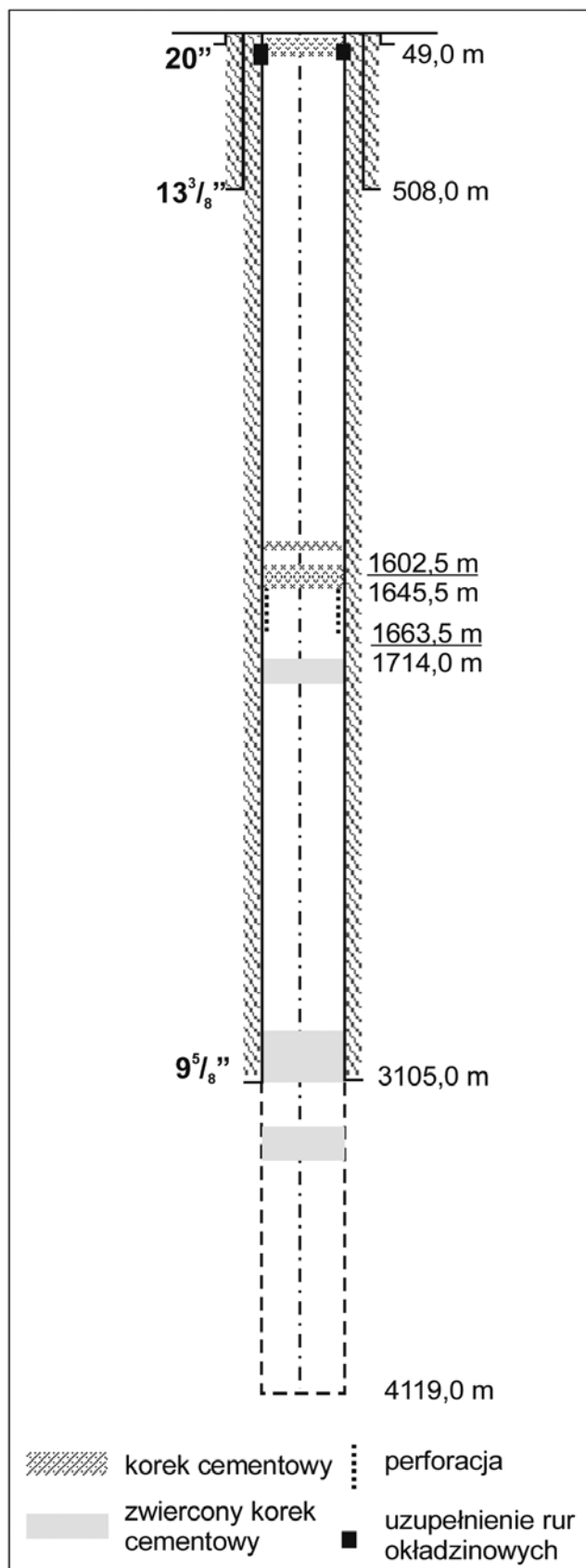
W latach 1996÷1999 przeprowadzono pierwszą w Polsce rekonstrukcję starego, zlikwidowanego odwiertu Mszczonów IG-1 dostosowując go do celów geotermalnych. Rekonstrukcja została zrealizowana przez Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN w ramach projektu celowego finansowanego przez Komitet Badań Naukowych.

W ramach prac rekonstrukcyjnych przeprowadzono prace techniczne (prace wiertnicze i zabezpieczające stan techniczny odwiertu, udostępnienie strefy złożowej, instalacje i urządzenia eksploatacyjne) oraz badania i testy złożowe (pompowania oczyszczające, pomiarowe i przedeksplatacyjne, testy hydrodynamiczne, badania geofizyczne, badania stanu technicznego odwiertu, badania fizykochemiczne wód i badania mineralogiczno-petrograficzne) [5].

Prace wiertnicze przeprowadzone w ramach rekonstrukcji otworu Mszczonów IG-1 (rys. 1) miały następujący przebieg [5]: zwiercenie korków cementowych w interwale 0,0 ÷ 1612 m p.p.t.; frezowanie rur i korka mechanicznego w głębokości 59,6 - 60,3 m p.p.t.; płukanie odwiertu do głębokości 1793 m p. p. t. w celu usunięcia materiału pochodzącego ze zwierconych korków; wymiana płuczki wiertniczej na wodę; szablonowanie rur okładzinowych 9 5/8" do głębokości około 200 m; zdiagnozowanie przyczyn komplikacji w interwale 55 ÷ 58,5 m poprzez przegląd kamerą oraz badania kawernomierzem 80-ramiennym; frezowanie w celu uzyskania drożności odwiertu do głębokości około 60 m; uzupełnienie kolumny rur 9 5/8" (od 23,6 m p.p.t) do wierzchu bez dokręcania, ale ze stabilizowaniem centrycznym w rurach 13 3/8"; szablonowanie kolumny rur okładzinowych do głębokości 200 m p.p.t.

Przeprowadzone prace umożliwiły wykorzystanie odwiertu Mszczonów IG-1 do eksploatacji wód termalnych. Zdaniem autorów jest to dobry przykład sprawnego i taniego sposobu adaptacji starego odwiertu dla potrzeb geotermalnych.

Dolnokredowy poziom wód termalnych udostępniono przez perforację rur okładzinowych 9 5/8" w głębokościach 1602,5 ÷ 1645,5 m oraz 1663,5 ÷ 1714,0 m. Po wykonaniu perforacji stwierdzono przyływ wód termalnych do odwiertu [5].



Rys. 1. Schemat konstrukcji odwiertu geotermalnego Mszczonów IG-1 po rekonstrukcji (na podst. [5] ze zmianami)
 Fig. 1. Mszczonów IG-1 geothermal well after workover operations (after [5] with changes)

3.2. Naprawa stanu technicznego odwiertów geotermalnych

Długoletnia eksploatacja wody termalnej lub zatłaczanie schłodzonych wód może spowodować pogorszenie stanu technicznego, a zwłaszcza szczelności rur eksploatacyjnych, wyposażenia w głębinie odwiertu lub uszkodzenia przepuszczalności skał zbiornikowych strefy przyodwiertowej, powstanie nieszczelności w kamieniu cementowym oraz powstanie zasypów (np. piasek, sól, rdza). O wystąpieniu tych problemów może świadczyć spadek wydobywania wody termalnej lub zwłaszcza spadki chłonności.

Prace wiertnicze mające na celu usunięcie tych uszkodzeń powinny się poprzedzić badaniami geofizycznymi, analogicznymi jak w przypadku prac adaptacyjnych, które pozwolą na dobór odpowiednich rozwiązań rekonstrukcyjnych. Podczas naprawy stanu technicznego odwiertów geotermalnych realizuje się głównie następujące prace:

- wymianę rur okładzinowych, względnie zapuszczenie do starych rur nowej kolumny rur o odpowiednio mniejszej średnicy;
- przerabianie zasypów solnych, ilowych oraz rdzy,
- docementowywanie interwałów odwiertu, w których stwierdzono nieszczelności rur okładzinowych lub ubytki płaszczu cementowego.

Przykładem prac mających na celu naprawę stanu technicznego była rekonstrukcja odwiertu Biały Dunajec PAN-1, który wykonano w latach 1988 ÷ 1990 na zlecenie Polskiej Akademii Nauk – Centrum Podstawowych Problemów Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią (obecnie Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią). Na początku odwiert ten działał w dublecie geotermalnym z odwiertem Bańska IG-1, jako zatłaczający. Ciepło geotermalne było wykorzystywane w obiekcie Doświadczalnego Zakładu Geotermalnego PAN w Bańskiej Niżnej. Od 1993 roku odwiert Biały Dunajec PAN-1 funkcjonuje w ramach systemu geotermalnego Geotermii Podhalańskiej SA. W trakcie prac przygotowawczych do zabiegu kwasowania węglanowych skał wodonośnych w 2003 roku stwierdzono konieczność wykonania prac rekonstrukcyjnych, co miało poprawić chłonność odwiertu Biały Dunajec PAN-1. Podczas tych prac stwierdzono nieszczelności rur okładzinowych kolumny eksploatacyjnej na głębokościach 355,0 m i 360,0 m. Poniżej uszkodzenia rur zapięto paker izolujący strefę produkcyjną, a odwiert wyłączono z systemu eksploatacji wód termalnych. Rekonstrukcję odwiertu Biały Dunajec PAN-1, której celem było przywrócenie możliwości zatłaczania wody termalnej do złoża wykonano dopiero w 2011 roku.

W ramach rekonstrukcji odwiertu Biały Dunajec PAN-1 (rys. 2) przeprowadzono następujące prace [7]:

- demontaż termalnej głowicy eksploatacyjnej,
- montaż prewentera hydraulicznego oraz urządzenia wiertniczego;
- próby szczelności: przeciwerupcyjnego zabezpieczenia wylotu odwiertu, przestrzeni pierścieniowej oraz rur 9 5/8";
- wykonanie doszczelniających korków cementowych w interwałach: 355,0 ÷ 360,0 m oraz 0 ÷ 338,0 m;
- wyrabianie zasypu w głębokości 367,43 ÷ 395,5 m;
- próba szczelności w rurach 9 5/8", w interwale 0 ÷ 393,5 m;
- zwiercenie korka typu *Bridge Plug* izolującego strefę produkcyjną;
- zatłoczenie odwiertu płuczką obciążoną barytem (w celu wyrównania ciśnienia na dnie odwiertu);
- frezowanie w rurach okładzinowych i oczyszczanie ich skrobakiem;

- pomiar MIT 60 oraz cementomierzem poniżej głębokości 2048,0 m;
- wypłukiwanie zasypu; wykonanie korka cementowego na głębokości 2030,0 m;
- zapuszczenie do odwiertu rur okładzinowych o średnicy 7" do głębokości 2023,0 m, zacementowanie ich do wierzchu i wykonanie ciśnieniowej próby ich szczelności;
- zwiercenie korka cementowego i korka mechanicznego oraz przerobienie odwiertu frezem do głębokości 2070,0 m oraz przerobienie zasypu do głębokości 2150,0 m;
- zatłoczenie płuczki o podwyższonej lepkości;
- płukanie odwiertu oraz wypłukiwanie zasypu od głębokości 2115,0 m do całkowitej klarowności wody oraz zdemontowanie urządzenia wiertniczego;
- kwasowanie odwiertu z użyciem jednostki azotowej.

W wyniku przeprowadzonych prac cementowania, rurowania i kwasowania uzyskano odpowiednią chłonność odwiertu Biały Dunajec PAN-1.

Zdaniem autorów na bazie doświadczeń z przeprowadzonych prac, można będzie w przyszłości zaprojektować efektywniejszy scenariusz naprawy stanu technicznego podobnego odwiertu, poprzez bezpośrednie przystąpienie do oczyszczenia odwiertu z zasypu oraz zapuszczanie nowej kolumny rur okładzinowych o mniejszej średnicy, co znacznie skróciłoby czas rekonstrukcji oraz zmniejszyłoby koszty.

3.3. Udrożnienie strefy przyodwiertowej

Reakcje fizykochemiczne zachodzące w procesie schładzania wody termalnej, w wyniku których następuje zmiana jej stanu termodynamicznego prowadzą do wytrącania rozpuszczonych w wodzie składników mineralnych (głównie kalcytu, krzemionki lub siarczków). Osady te powodują kolmatację instalacji geotermalnej oraz strefy przyodwiertowej (*scaling*). Produkty wtórnego wytrącania wnikając do poziomu geotermalnego powodują spadek przepuszczalności skał wodonośnych w strefie przyodwiertowej ograniczając produktywność i chłonność odwiertów. Doświadczenia związane z zatłaczaniem wód do skał węglanowych (szczelinowych) wskazują, że proces ten zwykle nie napotyka na większe trudności. Większe trudności związane są z zatłaczaniem schłodzonych wód do skał piaskowcowych (porowych) [2, 14].

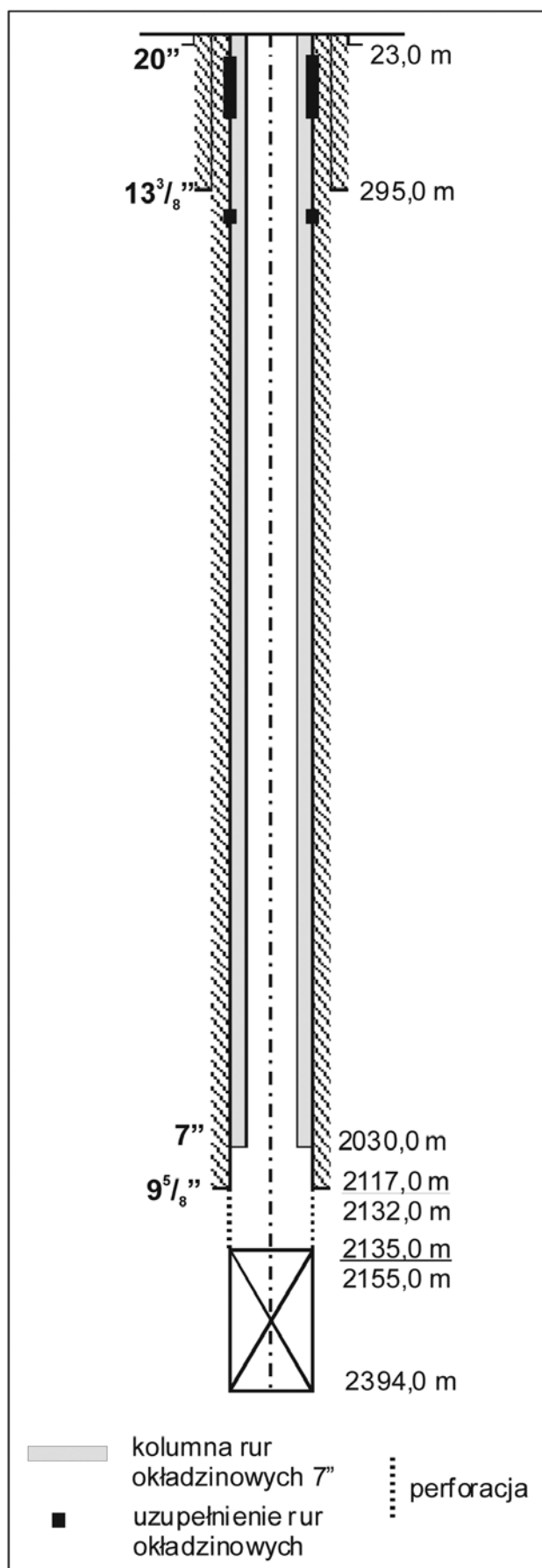
W przypadku występowania *scaling* konieczne jest stosowanie zabiegów stymulacji wydobycia wody ze złóż geotermalnych. Do usuwania wtórnie wytrąconych osadów stosowane są zabiegi stosunkowo tanie i łatwe w wykonaniu takie jak: miękkie kwasowanie, zatłaczanie inhibitorów zapobiegających *scalingowi* lub biocydów ograniczających rozwój flory bakteryjnej [15].

Prace rekonstrukcyjne, jakie można wykonać w odwiertach geotermalnych w celu udrożnienia strefy przyodwiertowej, obejmują [1, 8, 10]:

- odchylenie końcowej części odwiertu i ponowne udostępnienie poziomu geotermalnego,
- kwasowanie (kwasowanie matrycy skalnej, szczelinowanie kwasem) skał wodonośnych,
- hydrauliczne szczelinowanie skał wodonośnych,
- termiczne szczelinowanie skał wodonośnych.

Odchylenie końcowej części odwiertu stosowane jest w przypadku, gdy inne sposoby oczyszczenia strefy przyodwiertowej (np. poprzez płukanie, szczelinowanie lub kwasowanie) nie były skuteczne. Jednak zastosowanie tej metody jest możliwe w przypadku, gdy litologia poziomu geotermalnego nie wykazuje dużej zmienności poziomej [10].

W celu odchylenia końcowej części odwiertu należy w rurach okładzinowych wyciąć okno, przez które wykonuje się odchylny odcinek odwiertu za pomocą silnika węgelnego.



Rys. 2. Schemat konstrukcji odwiertu Biały Dunajec PAN-1 po rekonstrukcji

Fig. 2. Biały Dunajec PAN-1 well after workover operations

Nowy odcinek odwiertu omija uszkodzoną strefę złożową. W części pionowej odwiertu można wykonać korek cementowy, w celu uniknięcia uszkodzenia strefy przyodwiertowej. Tego rodzaju rozwiązania stosowano między innymi w odwiertach geotermalnych w Meksyku, na Filipinach i w Gwatemali [10].

W ramach rekonstrukcji odwiertów geotermalnych wykonywane są również zabiegi stosowane powszechnie w górnictwie naftowym i gazownictwie takie jak, kwasowanie oraz hydrauliczne szczelinowanie skał wodonosnych z równoczesnym podsadzeniem wytworzonych szczelin piaskiem.

W odwiertach geotermalnych można wykonywać dwa rodzaje kwasowań: kwasowanie roztworem kwasów (solny, octowy) matrycy skalnej oraz szczelinowanie kwasem. Kwasowanie matrycy skalnej wykonuje się przy ciśnieniu poniżej ciśnienia szczelinowania. Pozwala ono na usunięcie osadów wytrąconych w strefie przyodwiertowej złoża w trakcie jego eksploatacji. Zatlaczany kwas rozpuszcza węglany, tlenki metali, siarczany, siarczki, chlorki lub krzemionkę amorficzną. Kwasowanie matrycy skalnej w odwiertach geotermalnych przeprowadza się również w celu oczyszczenia szczelin z zalegającego w nich wypełnienia pierwotnego lub osadzonego w trakcie eksploatacji złoża [8]. Zabieg ten przeprowadza się w trzech etapach. W pierwszym zatlacza się 10÷15 % kwas solny w celu rozpuszczenia osadów węglanowych. Drugi etap to zatlaczanie mieszaniny kwasu solnego (10 %) i fluorowodorowego (5%), która rozpuszcza minerały węglanowe oraz krzemionkowe (skalenie alkaliczne, ilaste). Ostatni etap ma na celu przepłukanie strefy przyodwiertowej i odwiertu po zabiegu i usunięcie cieczy pozabiegowej (poreakcyjnej). W odwiertach geotermalnych standardowo do ostatniego etapu wykorzystuje się wodę, niekiedy z dodatkiem substancji powierzchniowo-czynnych. Szczelinowanie kwasem, prowadzi się przy ciśnieniu zatlaczania powyżej ciśnienia szczelinowania skał. Zabieg ma na celu wytworzenie nowych szczelin lub zatlóczenia odpowiednich substancji rozpuszczających osady w nich występujące [1].

Zabieg hydraulicznego szczelinowania polega na zatlaczaniu specjalnych cieczy pod odpowiednio dużym ciśnieniem w interwał poddawany stymulacji, w celu utworzenia nowych szczelin. Hydrauliczne szczelinowanie pozwala również na poszerzenie istniejącej sieci szczelin. W celu podtrzymania efektu zabiegu i zapobieganiu zaciskania szczelin wprowadza się odpowiednią podsadzkę (zwykle piasek). W przypadku szczelinowania formacji skalnych o wysokich temperaturach złożowych istnieje wiele problemów z doбором płynu zabiegowego i podsadzki, należą do nich: rozkład pod wpływem temperatury cieczy sieciujących i zeli, zbyt duża filtracja cieczy zabiegowej powodująca powstanie mniejszych niż zaplanowano efektów szczelinowania oraz niszczenie podsadzki (propantu) pod wpływem wysoko zmineralizowanych wód. Zjawiskom tym można zapobiegać poprzez: zmniejszenie rozmiarów cząsteczek propantu, zwiększenie wydajności zatlaczania (skrócenie czasu zabiegu) oraz stosowanie cieczy o wyższych lepkościach. Opublikowane informacje dotyczące zabiegów hydraulicznego szczelinowania w otworach geotermalnych są nieliczne i pochodzą głównie z USA. W ostatnich kilku latach wykonano wiele prac badawczych i eksperymentalnych dotyczących hydraulicznego szczelinowania skał w celu pozyskiwania z nich energii cieplnej (tworzenie zaawansowanych systemów geotermalnych – *Enhanced Geothermal System (EGS)*). Prace takie prowadzone są głównie na terenie USA (Fenton Hill) oraz Francji (Soultz-sous-Forets). Badania nad możliwościami tworzenia systemów EGS prowadzone są również, w Niemczech, Wielkiej Brytanii, Korei, Indiach Japonii i na Filipinach [1, 8].

Szczelinowanie termiczne jest odmianą szczelinowania hydraulicznego, jednak w tym przypadku powstanie szczelin nie jest wywołane ciśnieniem, a różnicą temperatur pomiędzy zatlaczaną wodą i temperaturą skał poziomu geotermalnego powodującą pękanie skał pod wpływem naprężeń termicznych. Stymulacja w tym przypadku odbywa się poprzez zatlaczanie cieczy (np. wydobywana woda, woda morska, woda podziemna lub wody powierzchniowe) o znacznie niższej temperaturze niż temperatura złożowa formacji. Zatlaczanie prowadzone jest ze znacznie mniejszym ciśnieniem niż w przypadku hydraulicznego szczelinowania. Jest to metoda mająca wiele zalet przede wszystkim ze względu na to, że ciecze wykorzystywane w termicznym szczelinowaniu są łatwe do przygotowania, tanie, nie stanowiące zagrożenia dla środowiska. Dodatkowo sam zabieg jest łatwy do przeprowadzenia. Głównym problemem, w przypadku tego zabiegu, może być zamykanie się szczelin związane ze wzrostem temperatury w poziomie geotermalnym. Jest to zagadnienie, które wymaga jeszcze dokładnego przebadania. Nie zawsze jednak jest on odpowiednim sposobem stymulacji złoża geotermalnego, zwłaszcza w przypadku, gdy szczeliny w poziomie zbiornikowym są wypełnione substancjami blokującymi przepływ. Dotychczas przeprowadzono wiele udanych zabiegów termicznego szczelinowania na Filipinach, w Meksyku, Japonii, Indonezji i na Gwadelupie [1, 8].

3.4. Instalacja wyposażenia wglębnego w przypadkach zmiany funkcji odwiertu

Wieloletnia eksploatacja i zatlaczanie wód termalnych, głównie w związku z występowaniem zjawisk scalingu i/lub korozji, może spowodować tak duże uszkodzenia w strefie przyodwiertowej, że nie będzie możliwe kontynuowanie pracy dubletu. Rozwiązaniem tego problemu może być zamiana ról pomiędzy odwiertami. Wymaga to prac adaptacyjnych polegających na przebrojeniu odwiertu wydobywczego na chłonny lub iniekcyjny na wydobywczy.

W przypadku adaptacji odwiertu wydobywczego na chłonny powinno się wykonać usunięcie filtra oraz wykonanie perforacji. Przekształcenie odwiertu zatlaczającego na eksploatacyjny wymaga: wykonania konstrukcji udostępnienia poziomu geotermalnego, zapuszczenia rur wydobywczych oraz zamontowania głowicy eksploatacyjnej. Jeżeli dublet pracuje w oparciu o poziom zbudowany ze skał węglanowych nie ma konieczności stosowania filtrów, strefa wydobywcza może być nieorurowana lub udostępniona przez perforację rur okładzinowych. Przy wydobywaniu wód termalnych z poziomów piaszczynowych strefę eksploatacyjną udostępnia się poprzez zafiltrowanie lub perforację rur okładzinowych.

Przykładem rekonstrukcji mającej na celu zmianę funkcji odwiertu była zamiana dokonana w dublecie eksploatowanym przez ciepłownię geotermalną w Stargardzie Szczecińskim. Złoża wód termalnych w Stargardzie Szczecińskim eksploatowane są od 2005 roku odwiertem pionowym ujmującym wodę termalną z utworów jury dolnej (Stargard Szczeciński GT-1), a drugi odwiert kierunkowy (Stargard Szczeciński GT-2) zatlaczał schłodzoną wodę. Głowice odwiertów oddalone są o 11 m, dna odwiertów znajdują się w odległości około 1 500 m. Woda termalna jest solanką o mineralizacji powyżej 140 g/dm³. Początkowo wydajność zatlaczania wynosiła 120 m³/h, po zatlóczeniu około 250 tys. m³ wody termalnej nastąpiło pogorszenie właściwości chłonnych, spadek wydajności do około 60 m³/h oraz wzrost ciśnienia zatlaczania. Po oczyszczeniu odwiertu chłonnego wydajność eksploatacji wody termalnej wzrosła do powyżej 200 m³/h. Po tym zabiegu obserwowano spadek wydajności wody termalnej

i wzrost ciśnienia zatłaczania, czasową poprawę uzyskiwano w wyniku powtarzanych zabiegów oczyszczenia odwiertu. Efekty zabiegów były coraz gorsze i coraz częściej je powtarzano. Ze względu na zbyt wysokie ciśnienie zatłaczania (4 MPa) pod koniec 2006 roku zatrzymano obieg geotermalny. W 2007 roku dokonano zmiany odwiertu Stargard Szczeciński GT-2 na eksploatacyjny w dublecie geotermalnym. Odwiert Stargard Szczeciński GT-1 przejął rolę odwiertu chłonnego. Po tym zabiegu ponownie uruchomiono pracę dubletu z wydajnością zatłaczania ponad 150 m³/h. Wyłączenie systemu geotermalnego spowodowało wychłodzenie się wody w złożu. Po ponownym uruchomieniu pompy wydobywano wodę o temperaturze niższej od tej sprzed wyłączenia układu. Stwierdzono, że obniżenie temperatury jest uzależnione od częstości wyłączeń oraz długości przestojów [3].

4. Podsumowanie

Analiza scenariuszy przemysłowych rekonstrukcji odwiertów geotermalnych umożliwia lepszy dobór zestawu koniecznych prac, z równoczesną rezygnacją z prac zbędnych. Dzięki temu skraca się znacznie czas rekonstrukcji oraz zmniejszają się koszty jej wykonania.

Adaptacja odwiertów poszukiwawczych oraz niektórych odwiertów naftowych dla potrzeb eksploatacji wód termalnych obejmuje zwykle poprawę stanu technicznego tych odwiertów oraz zastosowanie odpowiedniego wyposażenia w głębinowym w strefie złożowej. Analiza rekonstrukcji odwiertu Mszczonów IG-1 jest dobrym przykładem prac adaptacyjnych, zwłaszcza w zakresie technik udrażniania odwiertu oraz usuwania występujących komplikacji wiertniczych.

Analiza sposobu naprawy odwiertu Biały Dunajec PAN-1 umożliwiła autorom sformułowanie spostrzeżenia, że w podobnych przypadkach poprawę stanu technicznego starych odwiertów można szybko i skutecznie zrealizować poprzez zapuszczenie nowej kolumny eksploatacyjnej rur okładzinowych o odpowiednio mniejszej średnicy.

Poprawę warunków przepływu wody termalnej w strefie odwiertów wydobywczych i zatłaczających zwłaszcza w przypadkach występowania wysokiej temperatury złożowej (80°C i większej) można realizować poprzez: wykonywanie nowego odcinka odwiertu w strefie złożowej odchyłonego od poprzedniego; stosowanie termicznego szczelinowania skał wodonośnych; zmianę roli odwiertów w systemie geotermalnym (np. odwiert zatłaczający na wydobywczy i odwrotnie) oraz modyfikację konwencjonalnych zabiegów stymulacyjnych.

Pracę wykonano w ramach badań statutowych AGH nr 11.11.190.555.

Literatura:

1. *Aqui A.R., Zarrouk S.*: Permeability Enhancement of Conventional Geothermal Wells. New Zealand Geothermal Workshop 2011 Proceedings 21 - 23 November 2011, Auckland, New Zealand, s. 1÷10.
2. *Biernat H., Kulig S., Noga B.*: Problemy związane z eksploatacją ciepłowni geotermalnych wykorzystujących wody termalne z kolektorów porowych. Technika Poszukiwań Geologicznych Geotermia, Zrównoważony Rozwój 2010, nr 1-2, s. 17÷28.
3. *Biernat H., Noga B., Kosma Z.*: Eksploatacja wody termalnej przed i po zamianie roli otworu chłonnego na otwór eksploatacyjny na przykładzie Geotermii Stargard Szczeciński. Modelowanie Inżynierskie 2012, 44, s. 15÷20.
4. *Biernat H., Noga B., Kosma Z.*: Przegląd konstrukcji archiwalnych i nowych otworów wiertniczych wykonanych na Niżu Polskim w celu pozyskiwania energii geotermalnej. Modelowanie Inżynierskie 2012a, 44, s. 21÷28.
5. *Bujakowski W.* (red.) współautorzy Barbacki A. P., Bujakowski W., Graczyk S., Hołojuch G., Kazanowska A., Kępińska B., Pająk L., Uliasz-Misiak B.: Rekonstrukcja otworu Mszczonów IG-1 na potrzeby eksploatacji złoża geotermalnego do systemu grzewczego. W: Wybrane problemy wykorzystania geotermii – I. Studia Rozprawy Monografie nr 76, Kraków 2000, s. 63÷107.
6. *Dembowska J., Marek S.* (red.): Mszczonów IG 1, Mszczonów IG 2, Nadarzyn IG 1. Profile głębokich otworów wiertniczych Instytutu Geologicznego 1988, z. 65, s. 413.
7. *Dubiel S., Luboń K., Luboń W., Wartak W.*: Problemy rekonstrukcji odwiertów geotermalnych na przykładzie odwiertu Biały Dunajec PAN-1. AGH Drilling Oil Gas 2012, 29, s. 115÷126.
8. *Flores M., Davies D., Couples G., Palsson B.*: Stimulation of Geothermal Wells, Can We Afford It? Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24-29 April 2005, s. 1÷8.
9. *Gonet A., Śliwa T.*: Konstrukcje otworowych wymienników ciepła. W: Czysta energia, czyste środowisko 2008, Soliński I. (red.); Małopolsko-Podkarpacki Klaster Czystej Energii. — Kraków, Agencja Wydawniczo-Poligraficzna "ART-TEKST" 2008, s. 125÷133.
10. *Molina Argueta G.G.*: Rehabilitation of Geothermal Wells with Scaling Problems. The United Nations~ University, Geothermal Training Programme Reports 1995, Nr 9, s. 34.
11. *Soboń J.*: Konstrukcje otworów wydobywczych i zatłaczających w strefie udostępnianych geotermalnych horyzontów zbiornikowych. W: Atlas zasobów geotermalnych formacji mezozoicznej na Niżu Polskim (W. Górecki red.), Kraków 2006, s. 76÷77.
12. *Szamałek K., Sapińska-Śliwa A.*: Finansowanie projektów geotermalnych w Polsce i w Unii Europejskiej. W: Atlas zasobów geotermalnych formacji mezozoicznej na Niżu Polskim (W. Górecki red.), Kraków 2006, s. 139÷150.
13. *Szostak L., Dubiel S., Chrzęszcz W.*: Awarie i komplikacje przy wierceniu głębokich otworów. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków, 1985, s. 200.
14. *Tomaszewska B.*: Utylizacja schłodzonych wód termalnych. Problemy i propozycje rozwiązań alternatywnych. Technika Poszukiwań Geologicznych Geotermia, Zrównoważony Rozwój 2013, nr 1 s. 91÷102.
15. *Ungemach P., Antics M.*: Sustainable Geothermal Reservoir Management Practice. International Course and EGEN Business Seminar on Organization of a Successful Development of a Geothermal Project, 2009, s. 40.