

Rozwój otworowej technologii eksploatacji wód podziemnych na Wydziale Górnictwa i Geoinżynierii AGH

Development of the borehole water exploitation technology at the AGH UST Faculty of Mining and Geoen지니어ing



Dr inż. Krzysztof Polak^{*)}



Dr inż. Kazimierz Rózkowski^{*)}

Treść: Studnie głębinowe podlegają procesom starzenia i degradacji. O sprawności studni decyduje wielkość zeskoku hydraulicznego powstającego wskutek występowania strat hydraulicznych w strefie otworowej. Sprawność otworu studziennego można obliczyć, jako stosunek strat hydraulicznych występujących przy przepływie laminarnym do rzeczywistych (zmierzonych) strat ciśnienia w otworze studziennym. Prawidłowa praca otworu studziennego uzależniona jest od sprawności elementów składowych, przy czym niezawodność pracy systemu uzależniona jest głównie od stanu technicznego elementu, którego sprawność najbardziej odbiega od sprawności początkowej. Niezwykle zatem ważną sprawą dla utrzymania wysokiego poziomu niezawodności jest bieżąca diagnostyka stanu hydraulicznego elementów technicznych studni. Na podstawie zdobytych doświadczeń wprowadzono i zdefiniowano pojęcie zrównoważonej sprawności, przez którą rozumie się pracę obiektu przy parametrach technologicznych, przy których proces degradacji obiektu ma możliwie najwolniejsze tempo. Takie podejście pozwala na utrzymanie równomiernej degradacji starzeniowej, zarówno w strefie otworowej jak i przyotworowej, co w efekcie końcowym zwiększa szanse na skuteczną renowację studni.

Abstract: Waterwells are subject to aging and degradation. The efficiency of the well is determined by the size of the skin effect resulting from the occurrence of hydraulic losses in the borehole zone. The well efficiency can be calculated as the ratio of hydraulic losses occurring at the laminar flow to the actual (measured) pressure loss in the well. The correct operation of the well depends on the efficiency of the components, while the reliability of the whole system operation depends mainly on the technical condition of the element whose efficiency deviates most from the initial efficiency. Therefore, ongoing diagnostics of the hydraulic condition of the well's technical elements is extremely important for maintaining a high level of reliability. Based on the experience gained, the concept of sustainable efficiency was introduced and defined, which can be considered as the operation of the object at technological parameters at which the process of degradation of the object has the slowest possible rate. This approach allows to maintain even aging degradation, both in the borehole and in the surrounding zone, which ultimately increases the chances of successful well renovation.

Słowa kluczowe:

studnia głębinowa, sprawność, degradacja

Keywords:

water well, efficiency, degradation

1. Wprowadzenie

Zagadnienia hydrogeologii górniczej oraz technologii odwadniania kopalń na Wydziale Górnictwa i Geoinżynierii AGH podejmowane były najpierw w Katedrze Robót Górniczych Odkrywkowych Wydziału Górniczego AGH, a następnie w Instytucie Górnictwa Odkrywkowego, w Zakładzie Robót Udostępniających i Hydromechanizacji. W związku z dynamicznym rozwojem zarówno górnictwa węgla brunatnego, jak i górnictwa siarkowego na przełomie

lat 60. i 70. XX w. pojawiła się naturalna potrzeba doskonalenia metod i eksploatacji odkrywkowej, a także poszukiwania niekonwencjonalnych metod wydobywczych. Technologia eksploatacji otworowej stała się przedmiotem nauczania adeptów górnictwa. W ramach przedmiotu omawiane były zagadnienia eksploatacji złóż m. in. siarki, węgla, soli, uranu, bursztynów, etc.

Eksploatacja otworowa surowców stałych jest nierozdzielnie związana z ingerencją w zasoby zarówno wód podziemnych jak i powierzchniowych. Istota tej metoda eksploatacji polega na wykorzystaniu medium technologicznego – najczęściej wody, jednocześnie powodując niekorzystne

^{*)} AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, WGiG

zamiany w środowisku jej występowania. Początkowe badania skoncentrowane były na wykorzystaniu zasobów wodnych, z czasem jej ochronie i sposobie ograniczania wpływu na środowisko wodne.

W związku ze zmianami gospodarczymi, polegającymi na doskonaleniu metod pozyskiwania surowców z odpadów oraz wysoką podażą tych surowców na rynkach światowych zmienił się udział surowców stałych pozyskiwanych przy pomocy metod otworowych. Doświadczenia zebrane przy doskonaleniu metod otworowych znalazły zastosowanie w hydrogeologii górniczej czy technologii odwadniania złóż, ale także przy doskonaleniu technologii eksploatacji wód podziemnych.

2. Stan wiedzy

Wydobycie wód podziemnych na całym świecie wciąż rośnie. Szacuje się, że w ciągu pół wieku, tj. w latach 1960-2010, wolumen poboru wód podziemnych podwoił się (Wada 2010). Rośnie wciąż liczba studni głębinowych, co jest wynikiem nie tylko rosnącego zapotrzebowania na wodę, ale także zmniejszania się z biegiem czasu wydajności studzien. Podobnie bowiem jak inne urządzenia techniczne, studnie głębinowe podlegają procesom starzenia i degradacji. Aktualny stan techniczny studni głębinowej można opisać za pomocą wskaźnika sprawności. Sprawność studni zdefiniowana została pierwotnie przez Rorabaugha, jako stosunek depresji teoretycznej do pozornej, przy założeniu, że w otworze studziennym nie występuje przepływ turbulentny (Rorabaugh 1953). Walton zdefiniował sprawność jako stosunek teoretycznej wydajności jednostkowej do rzeczywistej wydajności jednostkowej studni (Walton 1955). Bierschenk natomiast stwierdził, że sprawność otworu studziennego można zdefiniować jako stosunek depresji teoretycznej do zmierzzonej (pozornej) wewnątrz odwiertu. W swojej pracy przedstawił on liczne przykłady krzywych sprawności obliczonych na podstawie próbnych pompowań przeprowadzonych w otworach studziennych wykonanych w krajach bliskiego wschodu (Bierschenk 1964). Stwierdzić można zatem, że o sprawności studni decyduje wielkość zeskoku hydraulicznego powstającego wskutek występowania strat hydraulicznych w strefie otworowej.

Straty hydrauliczne w otworze studziennym oraz jego najbliższym sąsiedztwie można wyznaczyć za pomocą testu próbnego pompowania. Zależność pomiędzy depresją pozorną (obniżeniem zwierciadła wody w studni) S a natężeniem przepływu Q opisuje się najczęściej w literaturze wzorem zaproponowanym przez Rorabaugha:

$$S = BQ + CQ^N \quad (1)$$

gdzie:

- B - współczynnik oporu hydraulicznego przy przepływie laminarnym przez ośrodek wodonośny [L/T^2],
- C - współczynnik oporu hydraulicznego przy przepływie turbulentnym w strefie otworowej [L^2/T^5],
- N - wykładnik potęgi, którego wartość zazwyczaj mieści się od w przedziale od 1 do 3.5.

Wartość wykładnika potęgi w powyższym równaniu sugeruje, że w strefie otworowej mogą występować przepływy o nieustalonym charakterze, bowiem przepływ burzliwy (turbulentny) opisywany jest wykładnikiem potęgi równy 2. Uznawane za przypadek szczególny równania (1), jest równanie zaproponowane pierwotnie przez Jacoba (1947), w którym wykładnik potęgi równy jest 2, tj.:

$$S = BQ + CQ^2 \quad (2)$$

Mackie, cytowany przez Atkinsona i in. (1994) dokonał przeglądu wyników ponad dwudziestu starannie przeprowadzonych testów pompowania próbnego w szczelinowych ośrodkach wodonośnych i stwierdził, że wyniki testów można zaklasyfikować do jednej z trzech kategorii, w których zależność pomiędzy depresją jednostkową S/Q a natężeniem przepływu Q jest:

- liniowa (wykładnik potęgi równy 1),
- wielomianowa (wykładnik potęgi równy 2),
- wielomianowa (wykładnik potęgi różny od 2).

Wyniki badań Motyki i Wilka (1984), dotyczące wyznaczenia zasięgu strefy nieliniowego przepływu, uzyskane na podstawie kilkudziesięciu próbnego pompowań w studniach wywierconych w skałach szczelinowanych wskazują, że promień zasięgu występowania przepływu burzliwego wynosi zwykle od 0,5 do 5,0 m, choć w większości przypadków nie przekracza 1 m. Atkinson i in. (2010) wnioskują, że wzrost prędkości przepływu powoduje zwiększenie zasięgu występowania reżimu turbulentnego, co powoduje zmianę wykładnika potęgowego we wzorze Rorabaugha.

Już w 1998 roku, w publikacji (Polak 2016) zaproponowano opis zjawiska rozwoju strefy turbulencji wokół studni. Analiza kilkudziesięciu próbnego pompowań wielostopniowych wykazała, że w każdym otworze studziennym wraz ze wzrostem prędkości przepływu mogą wystąpić następujące po sobie stany pracy:

- przepływ przez ośrodek wodonośny oraz strefę otworową odbywa się w reżimie laminarnym, co obserwowane jest przy względnie małych prędkościach przepływu,
- w strefie otworowej przepływ odbywa się w reżimie turbulentnym, natomiast przepływ przez ośrodek wodonośny odbywa się w reżimie laminarnym, co obserwowane jest przy średnich prędkościach przepływu,
- zasięg strefy turbulencji przechodzi do strefy przyotworowej warstwy wodonośnej, co obserwowane jest przy względnie dużych prędkościach przepływu.

Powyższy opis jest zasadniczo zgodny z pracami Motyki i Wilka (1984) oraz Atkinsona (2004). Stwierdzono jednakże, że za wzrost oporów przepływu nie jest odpowiedzialny wykładnik potęgowy N , a zmienna wartość współczynnika oporu hydraulicznego przy przepływie turbulentnym (C). Strefa turbulencji może mieć zmienny zasięg i przechodzić, przy wzroście wydajności studni, ze strefy otworowej do przyotworowej.

3. Rozwój badań

Stwierdzenie występowania opisanych trzech stanów pracy zasadniczo jest możliwe dla każdej studni, jednakże w praktyce jest to trudne do zarejestrowania przy wykorzystaniu jednego agregatu pompowego. Ma to związek z ograniczonym zakresem parametrów pracy głębinowych agregatów pompowych. W praktyce najczęściej test próbnego pompowania prowadzony jest przy wykorzystaniu jednego agregatu pompowego i umożliwia rejestrację zmian parametrów w zakresie jednego lub dwóch stanów pracy otworu studziennego. Stwierdzenie to znajduje uzasadnienie w publikacji (Polak 2016), w której omówiono test próbnego pompowania studziennego, zrealizowanego przy pomocy dwóch różnych agregatów pompowych, o różnych zakresach pracy. Przeprowadzone badanie umożliwiło zarejestrowanie pełnej charakterystyki studni, tj. od przepływów minimalnych do maksymalnych.

Prawdopodobieństwo prawidłowej identyfikacji stanu pracy otworu studziennego rośnie wraz z ilością stopni, na którym przeprowadzone jest pompowanie próbnego. Temat

ten rozwinięto szerzej w pracach (Polak, Kaznowska 2010, 2012). Przedmiotem badań była platforma badawcza, do której należy studnia głębinowa AGH-1, w której przeprowadzono serię klasycznych, jedno i trójstopniowych próbnych pompowań badawczych, a także pompowań wielostopniowych. Wszystkie testy wykonano w porównywalnych warunkach hydrogeologicznych. Interpretacja uzyskanych pomiarów, przy wykorzystaniu najczęściej opisywanych w literaturze metod, zarówno analitycznych (Polak, Kaznowska 2010), jak i graficznych (Polak, Kaznowska 2012), pozwoliła na dokonanie ich oceny porównawczej.

Uzyskane wyniki w skali półtechnicznej potwierdzone następnie zostały w warunkach przemysłowych. W pracy Polak i in. (2011) przedstawiono wyniki testu badawczego przeprowadzonego w warunkach operacyjnych, tj. w studni odwadniającej w kopalni węgla brunatnego.

Założenia przedstawione w pracy Klich i in. (1998) znalazły później potwierdzenie w publikacji Shekhara (2006), w której omówiono wyniki serii próbnych pompowań studziennych dla utworów wodonośnych o strukturze nieskonsolidowanej. Zauważono, że w strefie otworowej ruch jest turbulentny, nawet przy małym natężeniu przepływu. Natomiast przyrost depresji pozornej na kolejnych stopniach pompowania próbnego jest wynikiem zwiększania turbulencji w strefie otworowej, co skutkuje wzrostem oporów przepływu i zarazem strat hydraulicznych. W cytowanej publikacji uznano więc, że zjawisko w sposób zupełny opisuje równanie Jacoba (2).

Przepływ wody w warstwie wodonośnej o strukturze porowej może odbywać się w reżimie turbulentnym tylko dla utworów o dużej porowatości (np. w żwirach czy otoczakach), przy jednocześnie niskiej wartości wskaźnika nierównomierności uziarnienia, a także w ośrodkach szczelinowo-krasowych. Oznacza to, że w przypadku ośrodków wodonośnych nieskonsolidowanych ruch turbulentny występuje zazwyczaj bezpośrednio w strefie otworowej, natomiast w ośrodkach wodonośnych szczelinowych i szczelinowo-krasowych strefa turbulencji rozwija się w niewielkiej odległości, nie przekraczając kilku metrów od jej osi.

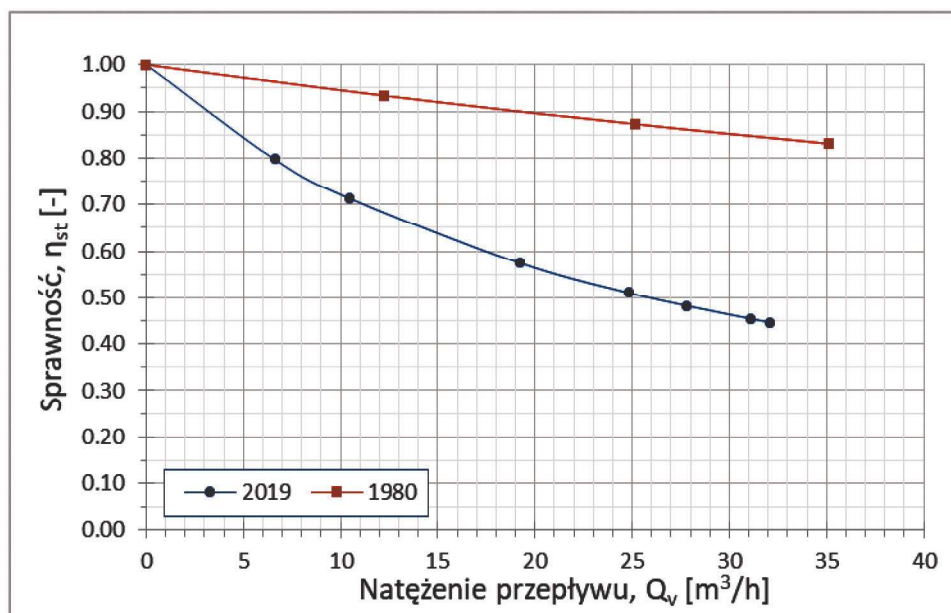
Biorąc pod uwagę powyższe, sprawność otworu studziennego można obliczyć jako stosunek strat hydraulicznych

występujących przy przepływie laminarnym do rzeczywistych (zmierzonych) strat ciśnienia w otworze studziennym. Oznacza to, że niezależnie od rodzaju ośrodka wodonośnego (porowy, porowo-szczelinowy, szczelinowy, szczelinowo-krasowy) oraz od typu otworu studziennego (filtrkowy, bezfiltrkowy) uniwersalnym i wiarygodnym wskaźnikiem oceny stanu hydraulicznego jest współczynnik sprawności. Na rysunku 1 przedstawiono charakterystyki sprawności studni nowej oraz po 39 latach eksploatacji.

4. Sprawność hydrauliczna otworu studziennego a zrównoważona sprawność

Obecnie najczęściej stosowanym kryterium hydraulicznym oceny stanu studni głębinowych jest współczynnik C . Parametr zalecany jest przez Polską Normę PN-G-02318/1994 - Studnie wiercone - Zasady projektowania, wykonania i odbioru. Jednakże określone w niej dopuszczalne wartości odnoszą się do studni nowych. Warto zauważyć, że w rzeczywistości parametr ten jest jedną ze składowych, decydujących o sprawności studni. W związku z tym nie może być on stosowany jako kryterium oceny stanu hydraulicznego studni w praktyce eksploatacyjnej. W trakcie pracy otworu studziennego, podobnie jak strefa otworowa, degradacji ulegać może także strefa przyotworowa. Stan hydrauliczny tej strefy decyduje o wydajności oraz depresji w warunkach ustalonych dopływu wody z ośrodka wodonośnego do studni. W związku z tym, do oceny stanu hydraulicznego studni eksploatowanych zaproponowano w pracy Polak i in. (2014) stosowanie współczynnika sprawności. Omówione zostały tam także wyniki obliczeń, które wskazują na niedoskonałości dotychczas wykorzystywanych metod prowadzenia próbnego pompowań. Znalazło to następnie odzwierciedlenie m.in. w publikacjach Macuda i in. (Macuda, Styrkowiec 2016, 2017, Macuda i in. 2018).

W pracy Polak i in. (2014) zdefiniowano pojęcie sprawności ogólnej ujęcia jako iloczynu sprawności: studni oraz agregatu pompowego. Mając na uwadze wyniki doświadczenia badawczego, przedstawiono przypadek przewymiarowania parametrów agregatu pompowego w stosunku do



Rys. 1. Charakterystyki sprawności studni nowej oraz po 39 latach eksploatacji
Fig. 1. The efficiency curves of the new well and after 39 years of operation

dopuszczalnych parametrów pracy studni. Wyniki testów laboratoryjnych wskazują, że w przypadku przewymiarowania agregatu pompowego możliwe jest dostosowanie parametrów poprzez regulację czynną, tj. z zastosowaniem przetwornic częstotliwości. Efektem tego jest dostosowanie charakterystyk sprawności studni oraz agregatu pompowego, przez co wzrasta sprawność ogólna pracy głębinowego ujęcia wody. W pracy zaproponowano również zastosowanie charakterystyki sprawności hydraulicznej jako uniwersalnego kryterium oceny stanu hydraulicznego wszystkich studni, w tym przede wszystkim studni eksploatowanych. W odróżnieniu od współczynnika C , który zaleca się do stosowania jako kryterium odbioru nowych studni, wskaźnik sprawności hydraulicznej jest parametrem uniwersalnym możliwym do zastosowania na każdym etapie eksploatacji obiektu technicznego, w tym także jako kryterium odbioru studni nowych.

Zagadnienie to rozwinęto w publikacji Polaka (2014) w której omówione zostały elementy składowe głębinowego ujęcia wody, posiadające własne krzywe sprawności. Ogólnie, wpływ na efektywność pracy ujęcia mają wszystkie elementy techniczne i nietechniczne ujęcia, w tym w szczególności: ośrodek wodonośny, orurowanie i zafiltrowanie otworu wiertniczego, wyposażenie maszynowe oraz armatura hydrauliczna. Zdefiniowano ogólnie sposób określania sprawności systemowej oraz określono metodykę doboru warunków współpracy poszczególnych elementów systemu. Wynikiem przedstawionych rozważań jest twierdzenie, że poszczególne elementy głębinowego ujęcia wody mają wpływ na sprawność ogólną (systemową) ujęcia, a prawidłowy dobór parametrów eksploatacji umożliwi wydłużenie tzw. czasu życia otworu studziennego. Przeprowadzona analiza pracy głębinowych studni odwadniających wskazuje, że przewymiarowanie agregatu pompowego skutkuje zmniejszoną efektywnością, prowadzącą nie tylko do strat energetycznych, ale także do przyspieszonej degradacji elementów technicznych studni i nietechnicznych ośrodka wodonośnego.

Jak wspomniano powyżej, ważnym czynnikiem decydującym o sprawności studni jest współczynnik oporu hydraulicznego przy przepływie laminarnym w ośrodku wodonośnym B . Wskaźnik ten determinuje dopuszczalne parametry eksploatacyjne studni głębinowej, a więc stanowi kluczową informację przy doborze sprzętu pompowego. W publikacji Polaka i in. (2015) określono metodykę oceny własności hydraulicznych ośrodka wodonośnego i omówiono zmienność parametru oporności hydraulicznej ośrodka B w zależności od własności hydrogeologicznych oraz lokalizacji otworu studziennego w leju depresji kopalni. Dla osiągniętego celu omówiono wyniki próbnych pompowań badawczych jakie przeprowadzano w jednej z kopalń węgla brunatnego. Na podstawie uzyskanych wyników obliczeń zdefiniowano hydrauliczną klasyfikację podatności ośrodka wodonośnego na odwodnienie, która uwzględnia zarówno konieczne wyprzedzenia robót odwadniających względem postępu frontu urabiania nadkładu, a także gęstość siatki otworów studziennych.

Skutki przewymiarowania wydajności otworu studziennego przedstawiono w pracy Polak i in. (2016), w której omówiono wyniki badań własności hydraulicznych żyrowych okładzin filtrów studziennych, wykorzystywanych w kopalniach węgla brunatnego. Test przeprowadzono dla okładziny filtrowej wydobytej z otworu studziennego oraz – porównawczo – dla nowej okładziny filtrowej o takim samym uziarnieniu. W trakcie likwidacyjnych prac demontażowych w terenie stwierdzono dezintegrację okładziny filtrowej, piaszczenie otworu oraz powstanie kawerny wokół uszkodzonego odcinka okładziny filtra studziennego. Badania hydrauliczne w laboratorium poprzedzono analizą zapisu parametrów pracy, z którego wynikało, że w pewnym przedziale czasu studnia

eksploatowana była z prędkościami przepływu większymi od dopuszczalnych. Wyniki badań laboratoryjnych wskazały na radykalne zmniejszenie przepuszczalności okładziny filtrowej po 10 latach pracy otworu studziennego, a znaczne zmniejszenie porowatości i wzrost prędkości przepływu wody skutkowało dezintegracją okładziny żyrowej oraz przedwczesną likwidacją studni.

Przedstawione rozważania doprowadziły do stwierdzenia, że prawidłowa praca otworu studziennego uzależniona jest od sprawności elementów składowych, przy czym niezawodność pracy systemu uzależniona jest głównie od stanu technicznego elementu, którego sprawność najbardziej odbiega od sprawności początkowej. Uszkodzenia w jednym z elementów systemu mogą powodować także dysfunkcyjną pracę elementów pozostałych, powodując nieodwracalne zmiany starzeniowe, a w efekcie końcowym awarię systemu. Niezwykle zatem ważną sprawą dla utrzymania wysokiego poziomu niezawodności jest bieżąca diagnostyka stanu hydraulicznego elementów technicznych studni. W publikacji Polaka i in. (2015) przedstawiono w sposób uogólniony podstawy metodyczne diagnostyki studni głębinowych. W celu rozwiązania problemu badawczego, do równania bilansu energii podstawiono równanie Jacoba (2). Dla określenia strat energii tradycyjny układ pomiarowy wyposażono w dodatkowy pomiar ciśnienia w dowolnie wybranym przekroju układu tłocznego. Rozwiązaniem kompletnym jest pomiar ciśnienia na króćcu tłocznym pompy, co umożliwia jednoznaczne określenie jej stanu hydraulicznego. Ze względu na ograniczenia praktyczne oraz wysokie koszty wspomnianego rozwiązania, pomiar ciśnienia może odbywać się np. na głowicy otworu. Takie rozwiązanie jest wystarczające, jeśli tylko próbne pompowanie pomiarowe odbywa się przy wykorzystaniu agregatu pompowego o znanej charakterystyce, np. podczas jego uruchomienia po zainstalowaniu w studni głębinowej.

Biorąc pod uwagę powyższe, zapisać można ogólną postać równania bilansu ciśnień (Polak i in. 2018):

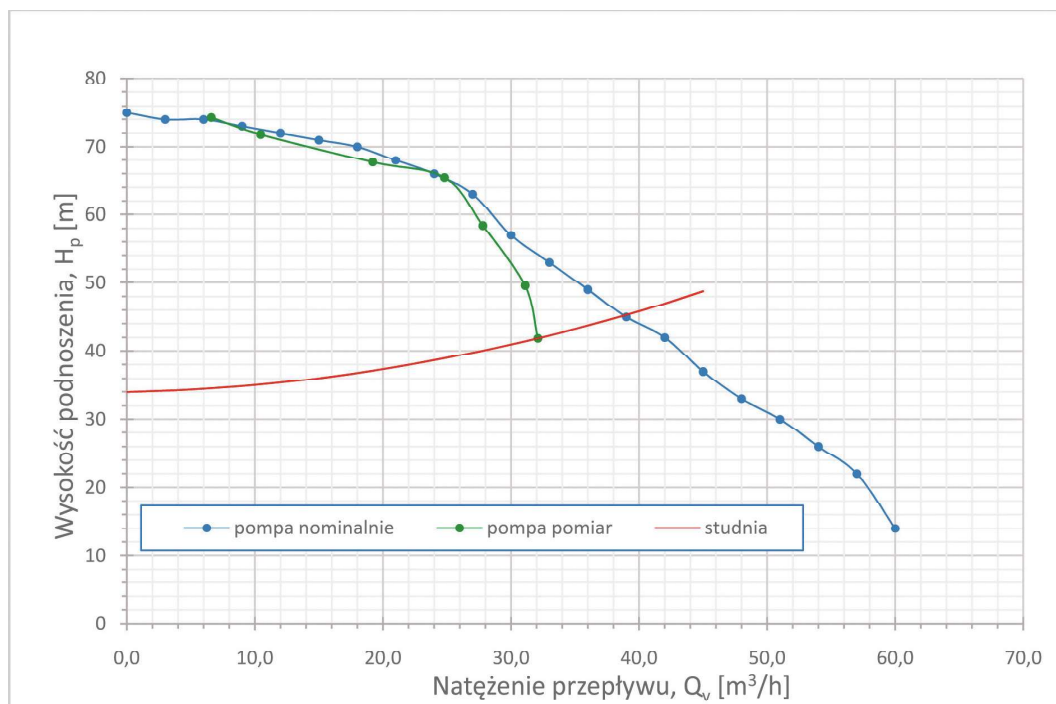
$$A_1 - C_1 Q^2 = (C + C_2) Q^2 + BQ + A + p/\gamma \quad (3)$$

gdzie:

- B, C – jak w równaniu (1),
- A – wysokość geometryczna podnoszenia [L],
- C_2 – współczynnik strat hydraulicznych w rurociągu tłocznym [T^2/L^5],
- A_1 – maksymalna wysokość podnoszenia pompy [L],
- C_1 – współczynnik strat hydraulicznych pompy [T^2/L^5],
- p/γ – wysokość ciśnienia (dławienia) w układzie tłocznym [L].

W trakcie próbnego pompowania, z wykorzystaniem agregatu pompowego o znanej charakterystyce, określa się parametry hydrauliczne studni C i B , przy czym przebieg funkcji depresji określany jest dla wszystkich punktów zgodnych z przyjętym opisem zjawiska (2). Oznacza to, że otwór studzienny współpracuje z ośrodkiem wodonośnym, w co najwyżej drugim stanie pracy, tzn. gdy pole turbulencji ograniczone jest przestrzennie do strefy otworowej. W takim przypadku jedyną niewiadomą, łatwą do wyznaczenia po przeprowadzeniu próbnego pompowania, jest wartość C_1 . Na rysunku 2. przedstawiono podstawowy wynik testu hydraulicznego studni głębinowej.

Warto zwrócić uwagę, że wartość p/γ wyraża wysokość ciśnienia w dowolnym punkcie wysokościowym układu tłocznego. W przypadku pomiaru ciśnienia na głowicy otworu wartość pomiaru jest sumą: pozostałej do pokonania geometrycznej wysokości podnoszenia, dynamicznych strat hydraulicznych, ale także dławieniowych strat ciśnienia w układzie tłocznym. Konkludując, stwierdzić można, że układ



Rys. 2. Wynik testu hydraulicznego studni oraz pompy w miejscu jej pracy
Fig. 2. The result of the hydraulic test of the well and the pump at the workplace

pompowo-tłoczny jest w równowadze bilansowej wówczas, gdy na najwyższym stopniu pompowania próbnego:

- straty dławieniowe równe są zero,
- depresja w studni jest skorelowana z zależnością Jacoba,
- agregat pompowy pracuje z wydajnością odpowiadającą maksymalnej sprawności BEP (ang. *Best Efficiency Point*),
- studnia głębinowa posiada odpowiednio wysoki współczynnik sprawności (zależnie od typu konstrukcji studni i rodzaju ośrodka wodonośnego).

Jeżeli jeden z tych warunków nie jest spełniony, oznacza to, że w układzie występują straty hydrauliczne, których wyeliminowanie poprawi sprawność ogólną układu, jego efektywność oraz niezawodność. Co więcej, jeśli ustabilizowanie pracy układu wymaga jego regulacji, oznacza to, że tracone są w nim zasoby energii.

W publikacji Polaka i Góreckiego (2016) przedstawiono rozwiązanie problemu badawczego na wybranym przykładzie przemysłowym. Badania diagnostyczne wykonano w eksploatowanej studni wodociągowej, którą wyposażono w rozszerzony układ pomiarowy. Przeprowadzone w tym przypadku badania wykazały, że pompowanie wody odbywa się z wykorzystaniem pompy o zbyt dużej mocy, co powoduje straty energii pobranej z sieci energetycznej. Następstwem tego jest znaczne pogorszenie stanu hydraulicznego otworu studziennego, obniżenie charakterystyki pompy wskazujące na zmiany degradacyjne oraz istotne pogorszenie stanu technicznego rurociągu tłoczego.

Opracowaną metodykę badawczą zastosowano także w studniach odwadniających. W publikacji Polaka (2016) omówiono przykładowe wyniki badań, które zrealizowano na grupie wybranych 40 studni odwadniających. W publikacji przeanalizowano 4 typowe przebiegi studziennych testów hydraulicznych. Jednym z przypadków jest oczekiwany stan, w którym współpraca agregatu pompowego z otworem studziennym oraz ośrodkiem wodonośnym odbywa się w sposób prawidłowy. Pozostałe 3 analizowane przypadki dotyczą sytuacji, kiedy dochodzi do zaburzeń współpracy pomiędzy ośrodkiem wodonośnym a głębinowym agregatem pompo-

wym wskutek np. nieprawidłowego doboru parametrów pracy czy też znacznego zaawansowania procesów degradacyjnych. W publikacji omówiono przykładowe przejawy odchylenia charakterystyk sprawności studni, które wynikają z przewymiarowania sprzętu pompowego w zakresie:

- natężenia przepływu,
- wysokości podnoszenia,
- obu wymienionych parametrów jednocześnie.

Warto zauważyć, że wartość przewymiarowania obliczyć można bezpośrednio na podstawie wyników próbnego pompowania, wykorzystując zależności na:

- wysokość podnoszenia:

$$DH_{sr} = (p_M - p_N) / g \quad (4)$$
- natężenie przepływu

$$\Delta Q_{sr} = Q_N - Q_M \quad (5)$$

gdzie:

- p_M – ciśnienie manometryczne w instalacji tłocznej, przy którym depresja w studni zgodna jest z równaniem (2),
- p_N – ciśnienie manometryczne w instalacji tłocznej na ostatnim stopniu pompowania próbnego,
- Q_N – natężenie przepływu na ostatnim stopniu pompowania próbnego,
- Q_M – maksymalne natężenie przepływu, przy którym depresja zmierzona (pozorna) w studni zgodna jest z równaniem (2).

Dostosowanie właściwej charakterystyki agregatu pompowego do studni może odbyć się poprzez regulację czynną lub też bierną. We wspomnianej publikacji przedstawiono ogólną analizę opłacalności wymiany agregatów pompowych dla grupy studni, w których stwierdzono przekroczenia parametrów eksploatacyjnych. Z analizy wynika, że regulacja jest wystarczająca tylko przy stosunkowo niedużych odchyleniach parametrów pracy od charakterystyk wzorcowych. Natomiast przy znacznych stratach hydraulicznych, potencjalne oszczędności z tytułu zmniejszonego zapotrzebowania na energię mogą być większe niż koszty poniesione na wymianę (korektę) maszyn przepływowych.

Wpływ wymiany agregatu pompowego na koszty eksploatacji studni głębinowej stały się także przedmiotem publikacji Polaka (2016). Próbné pompowania prowadzono w studni, która była poddana zabiegom renowacyjnym. W ramach prac badawczych przeprowadzono cztery testy diagnostyczne, z czego jedno z badań odbywało się w dwóch etapach, tj. przy wykorzystaniu dwóch agregatów pompowych o różnych polach pracy. Pozwoliło to na zdjęcie charakterystyki badanej studni w szerokim zakresie wydajności. Wykazano w ten sposób, że zastosowany typoszereg agregatu pompowego ma wpływ nie tylko na energochłonność, ale przede wszystkim na intensywność procesów starzeniowych zachodzących w studni głębinowej. Wyniki przeprowadzonych badań przemysłowych potwierdziły tym założenia metodyczne zdefiniowane wcześniej w pracy Atkinsona i in. (2010).

Skutki eksploatacji przy obniżonej sprawności studni głębinowej stały się przedmiotem publikacji Polaka i Kaznowskiej-Opali (2018). Przedstawiono w niej przypadek studni ujmującej wody z dwóch poziomów wodonośnych: płytszego nieskonsolidowanego (czwartorzędowego) oraz głębszego skonsolidowanego (kredowego). Eksploatacja wód podziemnych przy obniżonej sprawności hydraulicznej skutkowałą wzmogoną degradacją strefy otworowej. Efektem końcowym była awaria układu pompowego, ograniczenie wydajności studni, przeznaczenie znacznych środków finansowych na renowację otworu, a także w późniejszym okresie, wykonanie studni zastępczej. W pracy oszacowano także wskaźniki energochłonności, a także straty finansowe wynikające ze zwiększonego zapotrzebowania na energię.

Procesy degradacji otworów studziennych wynikają z naturalnego starzenia się obiektów technicznych. Z czasem następuje zmniejszenie sprawności, co powoduje wzrost energochłonności. Przyspieszenie procesów degradacyjnych jest wynikiem bieżącego stanu technicznego oraz istniejących uwarunkowań technologicznych. Zagadnienia te omówiono w publikacji Polak i in. (2019), w której podjęto się objaśnienia przyczyn wzmogonej degradacji studni oraz opracowania sposobów przeciwdziałania degradacji poprzez zastosowanie zabiegów kompensacyjnych. W literaturze hydrogeologicznej funkcjonowało dotychczas pojęcie zrównoważonej wydajności, przez którą rozumie się taką wydajność studni, przy której nie dochodzi do nadmiernego wyczerpania zasobów ujęcia. Piscopo i Summa (2007) zaproponowali nowe podejście do pojęcia zrównoważonej wydajności, którą zdefiniowali jako wydajność, przy której depresja w studni nie przekracza pewnej dopuszczalnej wartości. Regulacja wydajności ujęcia głębinowego w zaproponowanym rozwiązaniu odbywa się w sposób czynny, tj. poprzez regulację prędkości obrotowej napędu pompy głębinowej. Takie podejście pozwala na regulowanie wydajności studni w zależności od stanu zasobów wód podziemnych. Propozycja jest rozwiązaniem przyczyniającym się do ochrony tych zasobów. W kontekście ochrony studni jako obiektu technicznego propozycję tę uznać należy jednak za niewystarczającą. W związku z tym w publikacji Polaka i in. (2019) zdefiniowano także pojęcie zrównoważonej sprawności, przez którą rozumie się pracę obiektu przy parametrach technologicznych, przy których proces degradacji obiektu ma możliwie najwolniejsze tempo. W koncepcji tej zakłada się:

- wykorzystanie wyników próbných pompowań sprawnościowych – przeprowadzanych przy odbiorze obiektu od wykonawcy,
- ustalenie na tej podstawie bezpiecznych parametrów pracy studni,
- okresową kontrolę sprawności ujęcia lub monitoring ciągły,
- kompensację strat sprawności poprzez regulację parametrów technologicznych w trakcie eksploatacji obiektu.

We wspomnianej wyżej publikacji przedstawiono sposób

wykorzystania wyników badań sprawnościowych. Zwrócono uwagę na fakt, że charakterystyka sprawności studni jest funkcją homograficzną. W związku z tym, sprawność ujęcia jest odwrotnie proporcjonalna do wydajności i zależy jednocześnie od parametrów charakteryzujących oporność hydrauliczną zarówno ośrodka wodonośnego (B) jak i strefy otworowej (C). Dla studni pracujących przy odpowiednio wysokiej sprawności hydraulicznej zmiany przepuszczalności w obu strefach są równomierne. Dlatego zapisać można, że:

$$\frac{C}{B} = \alpha \quad (6)$$

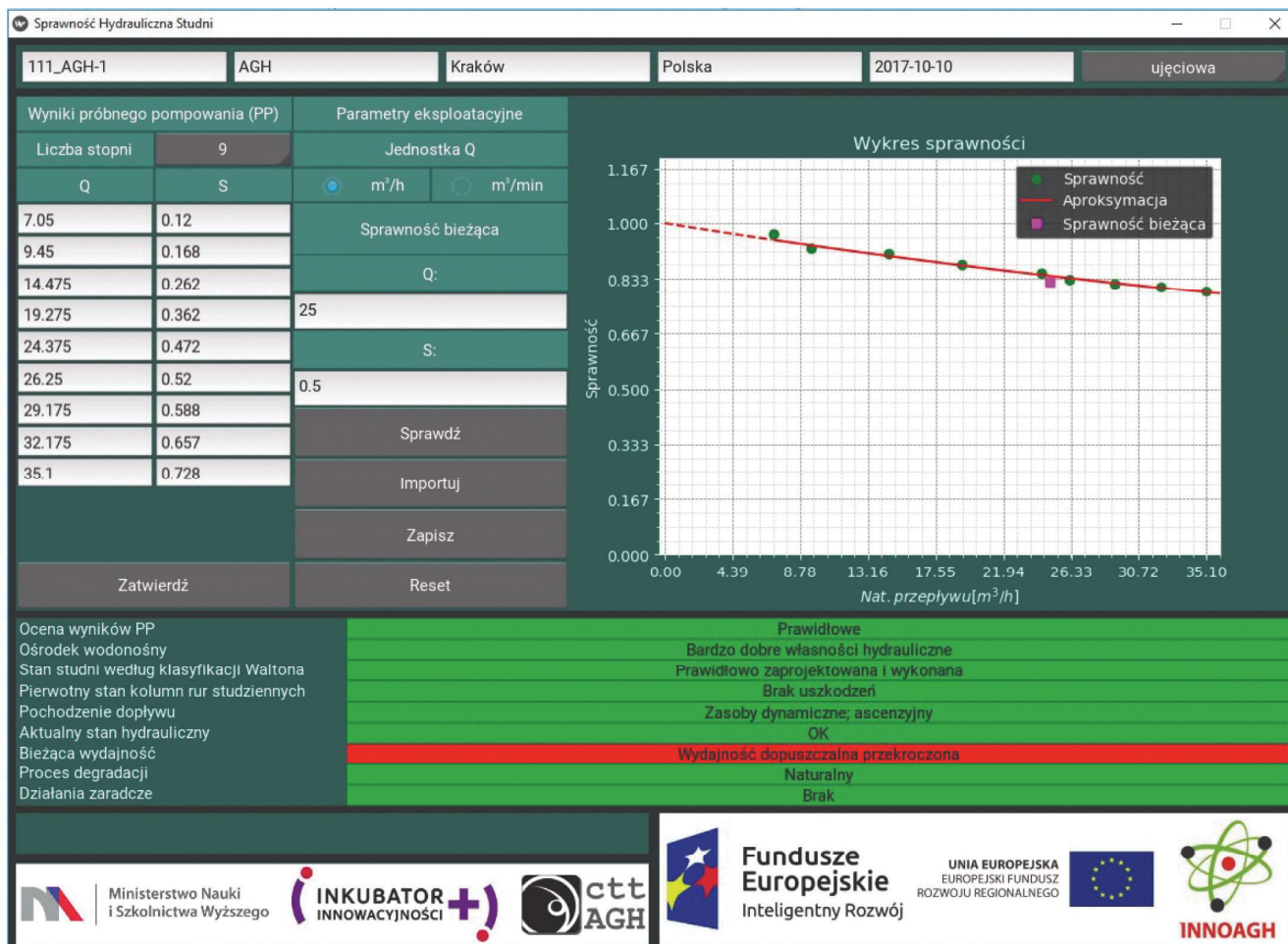
Warto zwrócić przy tym uwagę na fakt, że α^{-1} jest wydajnością studni, przy której współczynnik sprawności studni wynosi 0.5 (sprawność jest równa 50%). Informacja ta jest niezwykle istotna przy ustaleniu dopuszczalnych parametrów pracy otworu studziennego.

W zaproponowanej koncepcji zrównoważonej sprawności studni głębinowej zakłada się okresową kompensację sprawności, której częstotliwość uzależniona jest od parametru α oraz eksploatacyjnej sprawności początkowej. Zasadniczo kompensacja ta polega na redukcji parametrów pracy otworu w czasie. Takie podejście pozwala na utrzymanie równomiernej degradacji starzeniowej, zarówno w strefie otworowej jak i przyotworowej, co w efekcie końcowym zwiększa szanse na skuteczną renowację studni. Sama kompensacja sprawności prowadzona jest dopóki wydajność odwiertu jest większa od oczekiwanej. Dopiero po zmniejszeniu wydajności poniżej zadanej wartości zalecane są zabiegi renowacyjne, mające na celu podniesienie hydraulicznej sprawności studni do najwyższego możliwego poziomu. Tym samym zwiększana jest potencjalna wydajność studni.

W pracy przedstawiono zależności pozwalające na obliczenie czasu regulacji (kompensacji) parametrów pracy otworu studziennego. Opracowana koncepcja zrównoważonej sprawności ma zastosowanie do studni ujęciowych, w których warunki hydrogeologiczne nie ulegają zasadniczym zmianom w czasie, a także do wszystkich pozostałych studni charakteryzujących się wysokim wskaźnikiem sprawności hydraulicznej. Oznacza to, że metoda posiada ograniczone zastosowanie w przypadku studni odwadniających. W ich przypadku zaleca się wykonywanie regularnych pompowań sprawnościowych, pozwalających na dostosowanie parametrów pracy do zmiennych w czasie (nieustalonych) warunków hydrogeologicznych.

Opracowane wyniki badań, procedury obliczeniowe oraz reguły dotyczące oceny stanu hydraulicznego studni głębinowych wykorzystane zostały przy implementacji wiedzy do oprogramowania pn. SHS (Sprawność Hydrauliczna Studni). Program komputerowy powstał w ramach grantu przedwdrożeniowego, finansowanego przez MNiSW, w ramach programu Inkubator Przedsiębiorczości+ i jest obecnie przedmiotem licencji wyłącznej, udzielonej przez AGH podmiotowi komercyjnemu.

Wspomniany program komputerowy napisany został w języku Python. Opracowane procedury obliczeniowe są uniwersalne dla dowolnych konstrukcji studni głębinowych oraz dowolnych rodzajów ośrodków wodonośnych. Natomiast kryteria oceny stanu hydraulicznego studni zoptymalizowane zostały dla studni filtrowych działających w utworach nieskonsolidowanych. W kolejnym etapie prac wdrożeniowych planowane jest opracowanie kryteriów oceny dla dowolnie wybranych konstrukcji studziennych oraz ośrodków wodonośnych skonsolidowanych. Planuje się także wdrożenie oprogramowania w wersji WEB-owej i przeniesienie rozwiązania do chmury obliczeniowej, w której oceny stanu hydraulicznego odbywać się będą w trybie ciągłym, tzn. na podstawie odczytów przekazywanych zdalnie z aparatury pomiarowej.



Rys. 3. Interfejs programu SHS

Fig. 3. SHS program interface

Na rysunku 3. przedstawiono wynik działania programu dla platformy badawczej AGH-1.

5. Podsumowanie

Kierunek badań związanych z eksploatacją otworową ma długie tradycje na Wydziale Górnictwa i Geoinżynierii AGH. Po okresie prac zmierzających do wdrażania i udoskonalenia uznanych na świecie metod eksploatacji głównie siarki i soli, a także poszukiwania rozwiązań, czy adaptacji niekonwencjonalnych technik, wobec pozyskania tańszych metod produkcji, przede wszystkim siarki, rozpoczęto stopniowy proces likwidacji kopalń otworowych. Doświadczenie pozyskane przez pracowników Wydziału wykorzystano w innych zagadnieniach, zwracając się m.in. ku technologii odwadniania złóż, czy doskonaleniu technologii eksploatacji wód podziemnych.

Studnie głębinowe podlegają procesom starzenia i degradacji. Aktualny stan techniczny studni głębinowej można opisać za pomocą wskaźnika sprawności. O sprawności studni decyduje wielkość zeskoku hydraulicznego powstającego wskutek występowania strat hydraulicznych w strefie otworowej. Straty hydrauliczne w otworze studziennym oraz jego najbliższym sąsiedztwie można wyznaczyć za pomocą testu próbnego pompowania. Prawdopodobieństwo prawidłowej identyfikacji stanu pracy otworu studziennego rośnie wraz z ilością stopni, na którym przeprowadzone jest pompowanie próbne.

Na podstawie prowadzonych badań zauważono, że

w strefie otworowej ruch jest turbulentny, nawet przy małym natężeniu przepływu. Natomiast przyrost depresji pozornej na kolejnych stopniach pompowania próbnego jest wynikiem zwiększania turbulencji w strefie otworowej, co skutkuje wzrostem oporów przepływu i zarazem strat hydraulicznych. Biorąc pod uwagę powyższe, sprawność otworu studziennego można obliczyć jako stosunek strat hydraulicznych występujących przy przepływie laminarnym do rzeczywistych (zmierzonych) strat ciśnienia w otworze studziennym. Niezależnie od rodzaju ośrodka wodonośnego oraz od typu otworu studziennego uniwersalnym i wiarygodnym wskaźnikiem oceny stanu hydraulicznego pozostaje współczynnik sprawności. W odróżnieniu od współczynnika C, który zaleca się do stosowania jako kryterium odbioru nowych studni, współczynnik sprawności hydraulicznej jest parametrem uniwersalnym, możliwym do zastosowania na każdym etapie eksploatacji obiektu technicznego, w tym także jako kryterium odbioru studni nowych.

Prawidłowa praca otworu studziennego uzależniona jest od sprawności elementów składowych, przy czym niezawodność pracy systemu uzależniona jest głównie od stanu technicznego elementu, którego sprawność najbardziej odbiega od sprawności początkowej. Uszkodzenia w jednym z elementów systemu mogą powodować dysfunkcyjną pracę elementów pozostałych, powodując nieodwracalne zmiany starzeniowe, a w efekcie końcowym awarię systemu. Niezwykle zatem ważną sprawą dla utrzymania wysokiego poziomu niezawodności jest bieżąca diagnostyka stanu hydraulicznego elementów technicznych studni. W kontekście ochrony studni jako obiektu technicznego propozycję Piscopo i Summa

(2007), wprowadzając koncepcję zrównoważonej wydajności, uznano za niewystarczającą. Na podstawie zdobytych doświadczeń wprowadzono i zdefiniowano pojęcie zrównoważonej sprawności, przez którą rozumie się pracę obiektu przy parametrach technologicznych, przy których proces degradacji obiektu ma możliwie najwolniejsze tempo. W zaproponowanej koncepcji zakłada się okresową kompensację sprawności, której częstotliwość uzależniona jest od parametru *a* oraz eksploatacyjnej sprawności początkowej. Zasadniczo kompensacja ta polega na redukcji parametrów pracy otworu w czasie. Takie podejście pozwala na utrzymanie równomiernej degradacji starzeniowej, zarówno w strefie otworowej jak i przyotworowej, co w efekcie końcowym zwiększa szanse na skuteczną renowację studni.

Opracowane wyniki badań, procedury obliczeniowe oraz reguły dotyczące oceny stanu hydraulicznego studni głębinowych wykorzystano w rozwiązaniu informatycznym pn. SHS (Sprawność Hydrauliczna Studni). Program komputerowy powstał w ramach grantu przedwdrożeniowego, finansowanego przez MNiSW, w ramach programu Inkubator Przedsiębiorczości+ i jest obecnie przedmiotem licencji wyłącznej, udzielonej przez AGH podmiotowi komercyjnemu.

Literatura

- ATKINSON L.C., GALE J.E., DUDGEON C.R. 1994 - New Insight to the Step-Drawdown Test in Fractured-Rocks Aquifers. *Appl. Hydrogeol.* 2, 9–18.
- ATKINSON L.C., KEMPING P.G., WRIGHT J.C., LIU H. 2010 - The Challenges of Dewatering at the Victor Diamond Mine in Northern Ontario, Canada. *Mine Water Environ.* 29, 99-101.
- BIERSCHENK W.H. 1964 - Determining Well Efficiency by Multiple Step-Drawdown Tests. *International Association of Scientific Hydrology Publication, London.* pp. 493-507.
- JACOB C.E. 1947 - Drawdown test to determine effective radius of artesian well. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.* 112, 1047-1064.
- KLICH J., POLAK K., SOBCZYŃSKI E. 1998 - Opis metody oceny jakości wykonania i stanu studzien ujęciowych i odwadniających. III Międzynarodowa konferencja naukowo-techniczna: Zaopatrzenie w wodę miast i wsi. T. 1., 161-176.
- MACUDA J., STYRKOWIEC E. 2016 - The technical and technological aspects of commissioning a new intake wells. *AGH Drilling, Oil, Gas.* T. 33, nr. 3, 641-649.
- MACUDA J., STYRKOWIEC E. 2017 - Many years' extraction of groundwater in the context of established usable groundwater reserves, *AGH Drilling, Oil, Gas.* T. 34, nr. 2.
- MACUDA J., STYRKOWIEC E., RAJPOLD W. 2018 - Impact of wells reconstruction on their operational parameters. *AGH Drilling, Oil, Gas.* T. 35, nr. 1.
- MOTYKA J., WILK Z. 1984 - Zastępczy promień strefy nieliniowej filtracji wokół studni zgłębianej w skałach szczelinowo-krasowych. „Przeгляд Geologiczny”. 32, 90-94.
- PISCOPO V., SUMMA G. 2007 - Experiment of pumping at constant-head: An alternative possibility to the sustainable yield of a well. *Hydrogeol. J.* Vol. 15, 679-687.
- POLAK K. 2014 - Efektywność studni odwadniających. „Przeгляд Górnicy”. nr 10, 117-121.
- POLAK K. 2016 - Improvement Of Drainage Wells Efficiency. 24th World Mining Congress Proceedings, October 18-21, 2016, Rio de Janeiro, 133-142.
- POLAK K. 2016 - Ocena efektywności renowacji studni głębinowej za pomocą ditlenku węgla. „Górnictwo Odkrywkowe”. nr 4.
- POLAK K. 2017 - Interpretacja wyników próbnego pompowania studziennego na podstawie bilansu energii. „Technologia Wody”, nr 5, 40–43.
- POLAK K., GÓRECKI K. 2016 - Diagnostyka warunków pracy studni ujęciowej oraz systemu pompowo-łocznego na podstawie próbnego pompowania. *Gaz, Woda, Technika Sanitarna*, s. 285-289.
- POLAK K., GÓRECKI K., KAZNOWSKA-OPALAK. 2019 - The dynamics of water wells efficiency reduction and ageing process compensation. *Water.* Vol. 11, 117. s. 17.
- POLAK K., KAZNOWSKA K. 2010 - Comparison of methods used in Poland for the evaluation of dewatering wells. *International Mining Forum, Mine safety and efficient exploitation facing challenges of the 21st century.* 355-360.
- POLAK K., KAZNOWSKA K. 2012 - Porównanie parametrycznych metod oceny stanu studni wierconych. „Gaz, Woda, Technika Sanitarna”, nr 1, 5-8.
- POLAK K., KAZNOWSKA-OPALA K. 2018 - Ocena sprawności hydraulicznej studni głębinowych - studium przypadku. „Górnictwo Odkrywkowe”, nr 2, 63-66.
- POLAK K., KAZNOWSKA-OPALA K., PAWLECKA K. 2016 - Causes of Decreased Discharge and Damage to a Dewatering Well's Gravel Coat. *Mine Water and Environment.* Vol. 35, 1,2, 120-127.
- POLAK K., KAZNOWSKA-OPALA K., PAWLECKA K., KLICH J. 2014 - Analiza przebiegu próbnego pompowań na przykładzie studni badawczej AGH-1. „Przeгляд Górnicy”, nr 10, 106-111.
- POLAK K., KAZNOWSKA-OPALA K., PAWLECKA K., RÓZKOWSKI K., KLICH J. 2015 - The assessment of susceptibility on drainage in an aquifer on the basis of pumping tests in a lignite mine. *Archives of Mining Sciences.* T. 60, nr 1, 107-121.
- POLAK K., KLICH J., KAZNOWSKA K. 2011 - The method of wells' efficiency estimation. *Proceedings of the 11'th Congress of the International Mine Water Association.* 153-157.
- RORABAUGH M.J. 1953 - Graphical and Theoretical Analysis of Step Drawdown Test of Artesian Well. *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.* 79, 1-23.
- SHEKHAR, S. 2006 - An approach to interpretation of step drawdown tests. *Hydrogeol. J.* 14, 1018-1027.
- WADAY, VAN BEEK L.P.H., VAN KEMPEN C.M., RECKMAN J.W.T.M., VASAK S. BIERKENS M.F.P. 2010 - Global depletion of groundwater resources. *Geophys. Res. Lett.* 37, L20402.
- WALTON W.C. 1955 - Ground-Water Hydraulics as an Aid to Geologic Interpretation. *Ohio J. Sci.* 55, 13-20.

Artykuł wpłynął do redakcji – wrzesień 2019
Artykuł akceptowano do druku – 25.09.2019



LUBELSKI WĘGIEL
„BOGDANKA”
SPÓŁKA AKCYJNA

KOPALNIA
INTELIGENTNYCH
ROZWIĄZAŃ

jestemy notowani w indeksach:
mWIG40, WIG-GÓRNICZTWO, InvestorMS oraz Respect Index

www.lw.com.pl