



Efektywność studni odwadniających

Efficiency of dewatering wells

Dr inż. Polak Krzysztof^{*)}

Treść: Systemy przemysłowe zużywają na przepompowanie cieczy ponad 20 % energii elektrycznej produkowanej na świecie. Wykorzystanie potencjału pompowego przy minimalnych nakładach energetycznych wymaga właściwego doboru poszczególnych elementów składowych systemu i dostosowanie parametrów pracy urządzeń do warunków środowiskowych. W przypadku studni ujęciowych i odwadniających oznacza to konieczność wpasowania parametrów systemu pompowo-tłocznego do własności geohydraulicznych ośrodka wodonośnego. W artykule omówiono sposób oznaczania charakterystyk sprawności poszczególnych elementów składających się na system pompowo-toczny oraz sposób określania przebiegu charakterystyki sprawności studni. W końcowej części pracy poddano analizie dwa różne przypadki studni odwadniających pełniących odmienne funkcje w systemie odwodnienia kopalni odkrywkowej węgla brunatnego.

Abstract: To pump liquids, the industrial systems consume more than 20% of electricity produced in the world. Realizing the pumping potential with minimal energy expenditures requires a proper selection of particular components of the system as well as adapting the devices' parameters to the environmental conditions. In the case of intake and drainage wells this implies a necessity to fit the parameters of the pumping system to the geo-hydraulic properties of the aquifer. This paper describes a method of determining efficiency characteristics of various elements of the pumping system as well as a method for determining the characteristics and efficiency of the well. Two different cases of drainage wells, performing different tasks in the drainage system of an open-pit lignite mine were analyzed in the final part of the study.

Słowa kluczowe:

Agregat pompowy, układ tłoczny, studnia, ośrodek wodonośny, sprawność, punkt najwyższej sprawności

Key words:

pumping unit, pipeline, well, aquifer, efficiency, best efficiency point

1. Wprowadzenie

Odwadnianie jest jednym z najważniejszych pomocniczych procesów eksploatacyjnych. Prowadzony w celu m.in. zapewnienia bezpiecznych warunków pracy, jest bardzo kosztowny i znacząco zwiększa całkowite koszty produkcji górniczej.

Istotnym czynnikiem zwiększającym koszty pracy systemu odwadniania jest ilość zużytej energii elektrycznej. Jest to szczególnie istotne dla kopalń węgla brunatnego, gdzie podstawową metodą odwadniania jest system studzienny.

W całej Europie pracuje kilka tysięcy studni wierconych zużywających znaczne ilości energii. Z raportu sporządzonego przez Hydraulic Institute wynika, że zasilanie systemów pompowania zużywa blisko 20 % światowego zapotrzebowania na energię. Co więcej, wylicza się, że systemy pompowania zużywają od 25 % do 50 % całkowitej energii potrzebnej do funkcjonowania zakładu przemysłowego. Wielu użytkowników pomp nie zdaje sobie sprawy, iż koszty energii mogą stanowić od 30 % do 90 % całkowitych kosztów pompowania [4.].

Elementem wpływającym w znacznym stopniu na wielkość kosztów produkcji w zakładach górniczych jest spraw-

ność systemu odwadniania. Sprawność, zdefiniowana jako pochodna funkcji zależności mocy wejściowej do mocy wyjściowej, nie może być zmierzona bezpośrednio. W złożonych systemach na sprawność ogólną składa się sprawność jego poszczególnych elementów. Przykładowo, sprawność pojedynczej studni wierconej zależy od sprawności całego układu składającego się na wyposażenie studni. Podstawowymi elementami wchodzącymi w taki układ są: pompa, rurociąg, filtr studzienny, elementy zasilania i sterowania. Przy obliczaniu kosztów funkcjonowania należy brać pod uwagę sprawność każdego z elementów składowych systemu.

Praca z optymalną wydajnością układu pompowego zależy nie tylko od trafności doboru pompy, ale również od odpowiednio dobranych wszystkich pozostałych elementów systemu oraz środowiska pracy. W celu maksymalnego wykorzystania mocy dostarczonej do agregatu pompowego straty w układzie muszą być jak najmniejsze [2].

2. Straty w systemie odprowadzania wody

Straty powstają na różnych elementach układu. Zaliczamy do nich straty ciśnienia powstające w trakcie przepływu wody przez układ tłoczny oraz na skutek niedoskonałości technicznej wielu składowych elementów systemu.

^{*)} AGH w Krakowie, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii

Uproszczony wzór opisujący sprawność ogólną układu studziennego może zostać przedstawiony następująco:

$$E_s = E_p \cdot E_f \cdot E_r \cdot E_c \quad (1)$$

gdzie:

- E_p – sprawność agregatu pompowego
- E_f – sprawność filtrów studziennych
- E_r – sprawność rurociągu
- E_c – sprawność kabla zasilającego

W celu ograniczenia strat, system musi pozostawać w równowadze. Oznacza to, że straty ciśnienia w systemie muszą być zrównoważone ciśnieniem wytworzonym przez agregat pompowy. Postęp odwadniania oraz tworzenie się zeskoku hydraulicznego w studni powodują zwiększanie strat ciśnienia w systemie odwadniania. Dynamiczne zmiany w leju depresji powodują, że dobór odpowiedniego agregatu jest trudny i parametry wszystkich elementów składowych systemu odwadniającego muszą być korygowane. Warunki współpracy poszczególnych elementów systemu wyposażenia studziennego może być określony empirycznie – poprzez wykonanie próbnego pompowania lub też wykorzystanie przybliżonych procedur obliczeniowych.

Poniżej zostaną omówione sposoby obliczania poszczególnych składowych wchodzących w skład sprawności całkowitej.

2.1. Sprawność kabla zasilającego E_c

Sprawność kabla zasilającego definiuje się jako wartość prądu dostarczoną do agregatu w stosunku do wartości prądu w sieci zasilającej układ pompowy. Straty związane z opornością układu elektrycznego zapisać można jako

$$E_c = \frac{I_o V_o}{I_l V_l} \quad (2)$$

gdzie:

- V_o – potencjał elektryczny lub napięcie na silniku pompy, V,
- V_l – potencjał elektryczny lub napięcie w sieci zasilającej, V,
- I_o – natężenie prądu na silniku pompy, A,
- I_l – natężenie prądu w sieci zasilającej, A.

Sprawność kabla zasilającego dla nowych i sprawnych układów zasilających jest dostatecznie wysoka. Z praktycznego punktu widzenia ewentualne uszkodzenie kabla powoduje wypięcie sprzętu z sieci i zatrzymanie agregatu pompowego. Z tej też przyczyny sprawność kabla, jako zmienną niezależną w trakcie pracy agregatu, można pominąć.

2.2. Sprawność agregatu pompowego E_p

Obliczenie sprawności agregatu pompowego można dokonać na podstawie zależności:

$$E_p = \frac{QP_p}{P} \quad (3)$$

gdzie:

- Q – wydajność pompy, m³/s,
- P – ciśnienie wody na króćcu tłocznym pompy, Pa,
- P_p – znamionowa moc silnika, W.

Innym sposobem określenia sprawności agregatu pompowego jest wykonanie próbnego pompowania na stanowisku próbnym. W wyniku tego otrzymamy funkcję charakterystyki sprawności pompy. Funkcja ta ma postać (4):

$$E_p = a + bQ + cQ^2 \quad (4)$$

gdzie:

- a, b, c – współczynniki kierunkowe charakterystyki sprawności pompy.

2.3. Sprawność filtrów studziennych E_f

Charakterystykę studni $s = f(Q)$ uzyskuje się poprzez wykonanie próbnego pompowania wielostopniowego w studni i wyraża równaniem Jacoba [1]

$$s = BQ + CQ^2 \quad (5)$$

Sprawność filtrów studziennych można zatem wyrazić następującym wzorem [1]

$$E_f = \frac{BQ}{s} = \frac{BQ}{BQ + CQ^2} \quad (6)$$

gdzie:

- B i C są współczynnikami kierunkowymi charakterystyki studni.
- B – współczynnik oporności hydraulicznej przy przepływie laminarnym, s/m²,
- C – współczynnik oporności hydraulicznej przy przepływie nieliniowym (turbulentnym), s/m²
- s – depresja w studni, m

2.4. Sprawność rurociągu E_r

Określenie charakterystyki sprawności rurociągu odbywa się poprzez pomiar różnicy ciśnienia pomiędzy króćcem tłocznym pompy a wylotem z rurociągu. Straty na rurociągu zależą od ilości elementów, na których powstają straty miejscowe oraz od współczynników strat liniowych.

Sprawność rurociągu dla studni ze zmiennym w czasie poziomem zwierciadła wody wyrazić można jako:

$$E_r = \frac{P_1 - (H + S_i)\gamma}{P_2} \quad (7)$$

gdzie:

- P_1 – ciśnienie statyczne na króćcu tłocznym pompy, Pa,
- H – wysokość mierzona pomiędzy poziomem zwierciadła wody a wypływem swobodnym z rurociągu, m
- s – obniżenie zwierciadła wody w studni podczas i -tego stopnia pompowania, m
- γ – ciężar właściwy wody, m,
- P_2 – ciśnienie na wypływie swobodnym z rurociągu, m.

Podsumowując, sprawność ogólna układu studziennego zależy w głównej mierze od sprawności agregatu pompowego, filtrów studziennych oraz rurociągu, w związku z czym ostatecznie funkcję tą można zapisać następująco

$$E_s = E_p \cdot E_f \cdot E_r \quad (8)$$

3. Zużycie energii a sprawność systemu odwadniania

W trakcie próbnego pompowania regulacja wydajności odbywa się poprzez zmianę wartości strat na zaworze regulacyjnym. Wzrost strat na zaworze powoduje zmniejszenie prędkości przepływu i jednocześnie zmniejszenie strat na filtrze studziennym. Maksymalna sprawność studni występuje więc przy małych prędkościach wlotowych wody do studni.

Dla układu składającego się z agregatu pompowego oraz studni maksymalna sprawność osiągnięta zostanie w momencie, gdy agregat pompowy pracować będzie w punkcie najwyższej sprawności (BEP), a wydajność studni będzie

względnie mała W takich warunkach iloczyn sprawności agregatu i studni ma wówczas największą wartość. Rozwiązanie to jest korzystne m.in. z punktu widzenia efektywności energetycznej. Wysoka sprawność układu zapewnia długi czas funkcjonowania studni.

Mała wydajność niestety nie gwarantuje skutecznego odwodnienia. W tym celu konieczne jest zwiększenie wydajności studni do wartości maksymalnych, tj. bliskim prędkości krytycznej dopływu wody do studni. Zatem, aby mówić o efektywności odwadniania, musi być spełniony poniższy warunek:

$$\frac{Q}{E_s} \rightarrow \max \quad (8)$$

Przekroczenie prędkości krytycznych oznacza zmniejszenie sprawności studni oraz przyspieszenie procesu kolmatacji filtrów.

Porównanie sprawności poszczególnych elementów wyposażenia studni pokazano na rysunku 1.

Przebieg charakterystyki sprawności studni, na rysunku 1, przedstawiono w całym zakresie wydajności studni. Przy małej wydajności, tzn. gdy w całym polu filtracji przepływ jest laminarny, sprawność studni jest równa 100%. W obszarze przepływów turbulentnych w strefie otworowej sprawność maleje zgodnie z przebiegiem funkcji kwadratowej, a charakter krzywej zależy od współczynnika C w równaniu (6). Po przesunięciu się strefy przepływów turbulentnych do warstwy wodonośnej opory przepływu rosną [5]. Sprawność studni maleje a charakter krzywej zależy od współczynnika oporu hydraulicznego ośrodka wodonośnego przy przepływie turbulentnym C' . Warto podkreślić, że agregat pompowy E_{p2} posiada maksymalną sprawność odpowiadającą wydajności optymalnej studni.

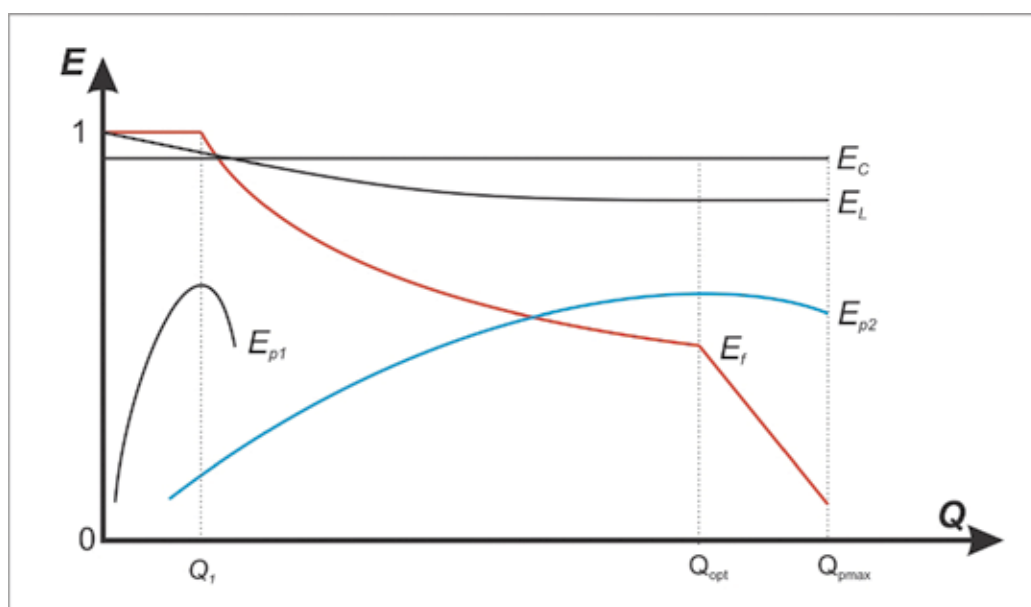
W celu dobrania odpowiedniego agregatu pompowego potrzebny jest dokładny obraz dotyczący właściwości systemu pompowo-tlocznego. Na różnicę wysokości ciśnienia w studni składa się suma statycznych strat ciśnienia, które wynikają z geometrycznej różnicy wysokości pomiędzy zwierciadłem wody a odpływem z rurociągu, a także straty wynikające z tarcia płynu o ścianki rurociągu.

Niezbędne informacje do właściwego doboru parametrów pracy systemu studziennego uzyskuje się poprzez zdjęcie charakterystyki rurociągu (tzw. charakterystyki instalacyjnej), a także charakterystyki studni.

4. Studium przypadku

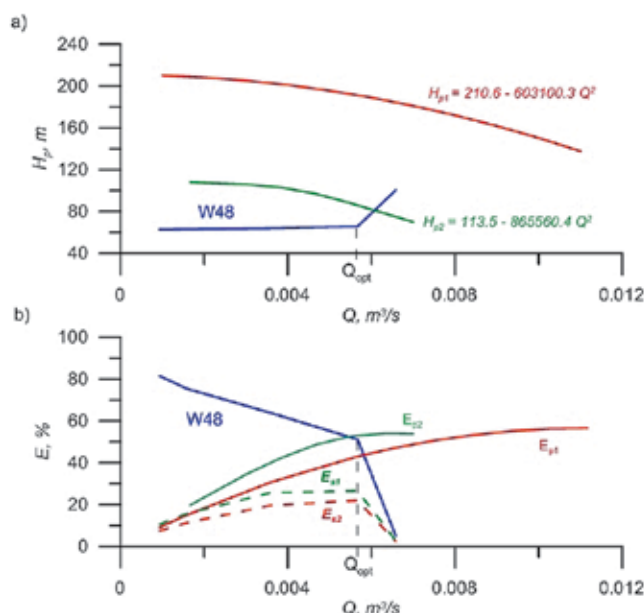
Celem weryfikacji rozważań przedstawionych w niniejszym artykule, poddano analizie dwa wybrane przypadki studni odwadniających, pracujących w kopalni węgla brunatnego. W ramach prowadzonych doświadczeń przeprowadzono próbne pompowania wielostopniowe przy wykorzystaniu agregatu większej mocy. Następnie obliczono sprawność ogólną układu dla dwóch zastosowanych w studni alternatywnych agregatów pompowych.

Pierwszy przypadek dotyczy studni wykonanej w barierze zewnętrznej. Przewidywany czas pracy studni wynosi kilkanaście lat. W studni zastosowano agregat pompowy 1 o mocy 26 kW, za pomocą którego wykonano próbne pompowanie. Następnie agregat pompowy wymieniony został na mniejszy 2, tj. o mocy 15 kW. Na rysunku 2 przedstawiono wyniki próbnego pompowania oraz porównanie charakterystyk agregatów pompowych.



Rys. 1. Charakterystyka sprawności poszczególnych elementów wyposażenia studni, E_{p1} – charakterystyka sprawności agregatu pompowego 1, E_{p2} – Charakterystyka sprawności agregatu pompowego 2, E_f – Charakterystyka sprawności filtrów studziennych, E_L – Charakterystyka sprawności rurociągu, E_C – Charakterystyka sprawności kabla zasilającego, Q_1 – wydajność studni ujęciowej, Q_{opt} – wydajność optymalna, Q_{pmax} – wydajność maksymalna agregatu pompowego

Fig. 1. Characteristics of the efficiency of individual pieces of well equipment, E_{p1} – performance characteristics of the pumping unit 1, E_{p2} – performance characteristics of the pumping unit 2, E_f – Characteristics of filters manhole efficiency, E_L – performance characteristics of the pipeline, E_C – Characteristics of power cord efficiency, Q_1 – discharge of intake well, Q_{opt} – optimal discharge of dewatering well, Q_{pmax} – maximal discharge of the pumping unit



Rys. 2. Charakterystyki a – agregatów pompowych oraz studni W48, b – sprawności studni W48, E_{p1} – agregatu pompowego 1, E_{p2} – agregatu pompowego 2, E_{s1} – sprawności ogólnej układu 1, E_{s2} – sprawności ogólnej układu 2; H_p – wysokość podnoszenia, Q_{opt} – wydajność optymalna studni.

Fig. 2. a) Characteristics of pumping units and wells W48, b) characteristics of the efficiency of wells W48, E_{p1} – pumping unit 1, E_{p2} – pumping unit 2, E_{s1} – total efficiency of system 1, E_{s2} – total efficiency of system 2, H_p – pumping head, Q – discharge. Q_{opt} – optimal well discharge

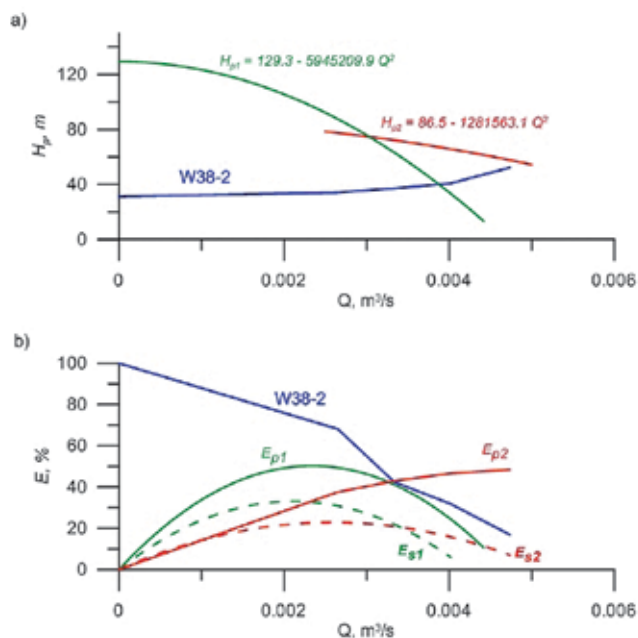
Optymalna wydajność dla agregatu 1 wynosi $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$. W trakcie próbnego pompowania stwierdzono, że maksymalna dopuszczalna wydajność studni wynosi $0,006 \text{ m}^3/\text{s}$, co stanowi 60 % maksymalnej wydajności agregatu. Konieczność dławienia agregatu pompowego 1 powoduje, że pracuje on ze stosunkowo niską sprawnością. Sprawność ogólna układu wynosi 18 %.

W związku z powyższym wymieniono agregat pompy na mniejszy, który maksymalną sprawność posiada dla wydajności $0,005 \text{ m}^3/\text{min}$. Obliczona sprawność układu wynosi 25 % i jest większa o 7 % w porównaniu z zastosowanym agregatem 1.

Efektom zabiegu jest zmniejszenie poboru mocy oraz praca studni z wydajnością w zakresie dopuszczalnych prędkości przepływu wody. Skutkiem tego będzie zmniejszenie tempa starzenia się studni, a co za tym idzie wydłużenie czasu jej pracy.

Drugi przypadek dotyczy studni wykonanej na przedpolu prac górniczych, znajdującej się w zasięgu pracy kopalni. Przewidywany czas jej pracy wynosi kilka miesięcy. W studni zastosowano agregat pompy 1 o mocy 5,5 kW. Ze względu na małą depresję w otworze studziennym, która nie zapewniała dostatecznego odwodnienia przedpola pracy kopalni, agregat pompy został wymieniony na większy 2, tj. o mocy 9 kW. Za pomocą nowego agregatu pompowego wykonano próbne wielostopniowe pompowanie. Na rysunku 3 przedstawiono wyniki próbnego pompowania oraz porównanie charakterystyk agregatów pompowych.

Optymalna wydajność dla agregatu 1 wynosi $0,002 \text{ m}^3/\text{s}$, a uzyskana depresja w trakcie pracy wyniosła zaledwie 4,5 m. Wymiana agregatu na większy pozwoliła na pompowanie



Rys. 3. Charakterystyki a – agregatów pompowych oraz studni W38-2, b – charakterystyki sprawności studni W38-2, E_{p1} – agregatu pompowego 1, E_{p2} – agregatu pompowego 2, E_{s1} – sprawności ogólnej układu 1, E_{s2} – sprawności ogólnej układu 2; H_p – wysokość podnoszenia,

Fig. 3. a) characteristics of pumping units and wells W38-2, b) characteristics of the efficiency of the well W38-2, E_{p1} – pumping unit 1, E_{p2} – pumping unit 2, E_{s1} – total efficiency of system 1, E_{s2} – total efficiency of system 2, H_p – pumping head

z wydajnością $0,0047 \text{ m}^3/\text{s}$ oraz uzyskanie depresji w studni dochodzącej do 19 m.

Agregat pompy 1 pozwalał na uzyskanie sprawności ogólnej równej 35 %, jednak skuteczność odwodnienia nie była zadowalająca. Wymiana agregatu na większy spowodowała zmniejszenie sprawności ogólnej układu do 10 %. Jednocześnie uzyskano zwiększenie zasięgu odwodnienia w rejonie pracy kopalni.

Zwiększenie wydajności powoduje przyspieszoną kolmatację studni. Jednak, ze względu na planowaną w krótkim czasie likwidację otworu, zwiększona wydajność poprawiła stan bezpieczeństwa prac górniczych.

5. Wnioski i uwagi końcowe

Podczas projektowania systemu studnia agregat pompy – rurociąg tłoczny konieczna jest znajomość przebiegu charakterystyk sprawności poszczególnych elementów składowych systemu. Niezwykle ważnym jest właściwy dobór optymalnych warunków pracy wszystkich charakterystyk systemowych.

Studnie głębinowe w kopalniach węgla brunatnego charakteryzują się pracą w zmiennych warunkach hydrogeologicznych. W wyniku systematycznego obniżania zwierciadła wody zmniejsza się wydajność jednostkowa. Potrzeba szybkiego obniżania zwierciadła wody powoduje, że agregaty pompy są często przewymiarowane. Wyniki badań wskazują, że przewymiarowanie agregatu pompowego wywołuje nadmierny zeskok zwierciadła wody. Przyczynia się to do gwałtownego spadku sprawności oraz przyspieszonego starzenia studni.

W dłuższej perspektywie czasowej może prowadzić to do zmniejszenia skuteczności odwodnienia.

Sukcesywna wymiana agregatów pompowych, których charakterystyki są dopasowane do bieżącej charakterystyki sprawności studni pozwala na utrzymanie minimalnego zeskoku hydraulicznego. Efektem tego jest utrzymanie studni w stanie stosunkowo wysokiej sprawności hydraulicznej.

Charakterystyki sprawności studni mogą być sporządzane przy wykorzystaniu agregatów pompowych zainstalowanych w studniach. Uzyskany wynik próbnego pompowania pozwala na dobór nowego agregatu pompowego, którego charakterystyka sprawności jest dostosowana do aktualnej sprawności hydraulicznej studni. Celem takiego podejścia jest wydłużenie czasu funkcjonowania studni.

W przypadku studni, których planowany czas pracy jest względnie krótki, możliwe jest okresowe zwiększenie wydajności pompowania, kosztem obniżenia sprawności. Nadrzędnym celem takiego działania jest zwiększenie bezpieczeństwa dla prac górniczych.

Literatura

1. *Bierschenk W H.*: Determining well efficiency by multiple step-draw-down tests. International Association of Scientific Hydrology 1963, pp.493÷507
2. *Kaya D., Alptekin Y E, Suleyman Y. K., Kilic F. C. Salih E. A. b, Celik C.*: Energy efficiency in pumps, Energy Conversion and Management 49 (2008) 1662÷1673,
3. *Palgrave R.*: Troubleshooting Centrifugal Pumps And Their Systems, Elsevier, – 384 p. 2003.
4. Hydraulic Institute; 2001; Pump life cycle costs: A guide to LCC analysis for pumping systems. Executive summary; [online];
5. https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech_assistance/pdfs/pumplcc_1001.pdf [dostęp: 28.04.2014].
6. *Wen Z., Huang G., Zhan H., Li J.*: Two-region non-Darcian flow toward a well in confined aquifer, Advanced in Water Resources, Elsevier 2008, p.817÷825