

Anatoli Hurynovich • Ekaterina Syczewa

# METODYKA OCENY KOSZTÓW CYKLU ŻYCIA STUDNI GŁĘBINOWYCH NA UJĘCIACH WÓD PODZIEMNYCH

---

Anatoli Hurynovich, prof. dr hab. inż. – Politechnika Białostocka

Ekaterina Syczewa, mgr – Białoruski Narodowy Uniwersytet Techniczny, Politechnika Warszawska

adres korespondencyjny:

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

Katedra Systemów Inżynierii Środowiska

ul. Wiejska 45 A, 15 – 351 Białystok

e-mail: gurinowicz@pb.edu.pl

e-mail: vesnyshka\_1987@mail.ru

## THE METHODOLOGY IN ESTIMATION OF COST OF LIFE CYCLE OF DEEP WELLS OF UNDERGROUND WATERS INTAKES

**SUMMARY:** The existing methodology in estimating the efficiency of water wells is not based on the principles of optimizing well design and does not include maintenance costs during the life cycle of the well. It is proposed to use to use metric indicators as a tool following engineering requirements for durability, quality and guarantee of certainty. The parameters and the basic elements of the water well, the change of which has a decisive influence on the final cost of construction and operation.

**KEY WORDS:** groundwater intakes, water wells, life cycle cost

---

## Wstęp

W Polsce i na Białorusi zaopatrzenie w wodę pitną ludności i przemysłu w dużym stopniu pochodzi z ujęć głębinowych, dla których buduje się studnie głębinowe. Studnia głębinowa (rysunek 1) jest urządzeniem bardzo skomplikowanym i kosztownym, charakteryzującym się znaczną liczbą wzajemnie powiązanych i współdziałających elementów, takich jak: dane warstwy wodonośnej (parametry hydrogeologiczne ujęcia, a wśród nich: współczynnik filtracji, wydajność jednostkowa, promień leja depresji, wydajność dopuszczalna), technologia wiercenia (agregaty wiertnicze i metoda wiercenia), konstrukcja studni (rury osłonowe, filtry), wyposażenie pompowni (rury, agregaty pompowe, armatura regulacyjna, sprzęt elektrotechniczny i automatyka). Systemy te wyróżniają się stochastycznym charakterem odbywających się w nich procesów. Wszystkie te elementy powinny jednocześnie spełniać swoje zadania w sposób zgodny z postawionymi wymaganiami technicznymi, przy odpowiednio wysokim poziomie jakości w ciągu założonego okresu eksploatacji.

Obecnie przy opracowywaniu projektów ocenę wariantów projektowych studni głębinowych ujęć wód podziemnych różnego typu (zróżnicowanych zarówno pod względem technicznym, jak i technologicznym) wykonuje się najczęściej za pomocą wskaźnika wartości prac, bez obliczenia wszystkich kolejnych nakładów w trakcie całego cyklu życia produktu. Takie podejście nie pozwala na obiektywną ocenę efektywności projektów przyjmowanych do realizacji i może z dużym prawdopodobieństwem doprowadzić do dodatkowych wydatków na remont i utrzymywanie w trakcie eksploatacji obiektu.

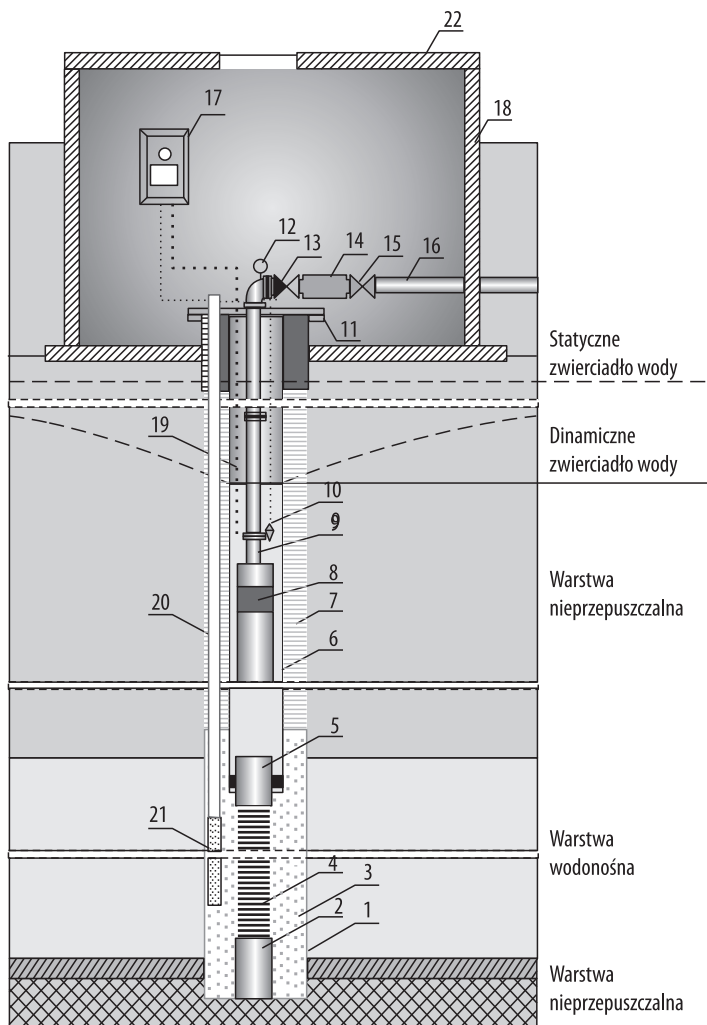
Okres eksploatacji zależy od typu i konstrukcji studni, metody ich wierceń, sposobu zabudowy, geologicznych i hydrogeologicznych warunków w czasie wiercenia, wykorzystanych technologii i materiałów, sposobu eksploatacji, czasów serwisu i remontów.

## Cykl życia studni głębinowej

Cykl życia studni głębinowej to okres, na który składają się następujące etapy: poszukiwanie i ustalanie zasobów wód podziemnych, projektowanie, wiercenie, prace budowlane, montaż pomp, rurociągów i armatury, eksploatacja (obejmująca obsługę techniczną oraz remonty profilaktyczne i bieżące), przebudowa, remont kapitalny i likwidacja (rysunek 2).

Wchodzące w skład studni głębinowych elementy i podsystemy także mają swoje cykle życia, które są ze sobą wzajemnie powiązane w określony sposób. Wzajemne oddziaływanie indywidualnych cykli życiowych tych elementów w jednej studni wiąże się z tak zwanym efektem synergicznym, który może doprowadzać do zmniejszania długości życiowego cyklu, jak i przy odpowiednich warunkach eksploatacji – do powiększenia długości cyklu życiowego studni.

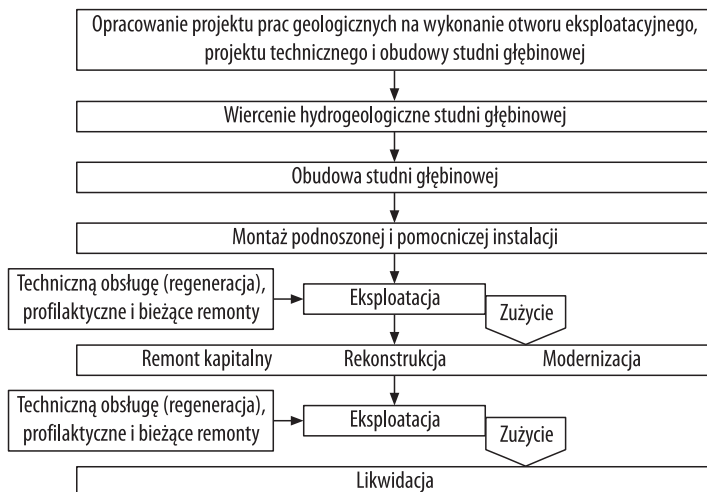
Rysunek 1  
Studnie głębinowe



1 – otwór wiertniczy; 2 – rura podfiltrowa; 3 – obsypka filtracyjna; 4 – filtr; 5 – rura nadfiltrowa; 6 – rura osłonowa; 7 – korek cementowy; 8 – pompa głębinowa; 9 – rurociąg tłoczny pompy głębinowej; 10 – urządzenie do pomiaru położenia zwierciadła wody; 11 – głowica; 12 – manometr; 13 – zawór zwrotny (zamykający przepływ wody); 14 – wodomierz; 15 – zasuwa; 16 – podłączenie rurociągu; 17 – stacja sterowania; 18 – obudowa studni; 19 – kabel elektryczny; 20 – piezometr; 21 – filtr piezometru; 22 – pokrywa.

Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 2  
Cykl życia studni głębinowej



Źródło: opracowanie własne.

## Analiza kosztów cyklu życia

Metoda analizy kosztów cyklu życia polega na identyfikacji i szacowaniu wszystkich kosztów związanych z cyklem życia produktu lub procesu<sup>1</sup>. W Polsce kwestie związane z wykonywaniem analizy kosztów cyklu życia reguluje norma PN-EN 60300-3-3 „Zarządzanie niezawodnością Część 3-3: Przewodnik zastosowań. Szacowanie kosztu cyklu życia”<sup>2</sup>.

Ogólny wzór na LCC zaproponowany w tej normie obejmuje główne fazy cyklu:

$$\begin{aligned}
 LCC = & K_p + K_z + K_b + K_i + \sum_{n=1}^{n=t} \frac{K_e (1+r_e)^n}{(1+i)^n} \\
 & + \sum_{n=1}^{n=t} \frac{K_{en} + K_{ex} + K_R + K_k + K_R + K_{in}}{(1+i)^n} + K_a + K_i
 \end{aligned}
 \quad (1)$$

gdzie:  $K_p$  – koszt projektu,  $K_z$  – koszt zakupu,  $K_b$  – koszty budowy,  $K_i$  – koszty instalacji,  $K_{en}$  – roczne koszty energii,  $K_{ex}$  – roczny koszt eksploatacji,  $K_k$  – roczne koszty

<sup>1</sup> H.P. Barringer, D.P. Weber, *Life Cycle Cost Tutorial. Fifth International Conference on Process Plant Reliability*, Houston, Texas 1996, www.barringer1.com [10-01-2013]; I. Dziaduch, *Modele szacowania kosztu cyklu życia: przegląd literatury*, „Logistyka” 2010 nr 2, www.czasopismologistyka.pl [10-01-2013]; Z. Kowalski, J. Kulczycka, M. Góralczyk, *Ekologiczna ocena cyklu życia procesów wytwórczych (LCA)*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 2007.

<sup>2</sup> Polski Komitet Normalizacyjny (PKN): PN-EN 60300-3-3: Zarządzanie niezawodnością. Część 3-3: Przewodnik zastosowań. Szacowanie kosztu cyklu życia, Warszawa 2005.

przeглядów,  $K_R$  – koszty napraw i regeneracji,  $K_m$  – inne koszty w roku, – koszt postoiu z powodu awarii,  $K_s$  – roczny koszt środowiskowy,  $K_l$  – koszt likwidacji,  $t$  – kolejny rok użytkowania instalacji,  $r_e$  – stopa wzrostu cen energii (4-5%),  $i$  – stopa dyskonta (5-6%),  $n$  – kolejny rok kosztów.

Długość życia i koszt cyklu życia (okres eksploatacji) studni głębinowych zależy od:

- wiarygodności parametrów hydrogeologiczno-technicznych warstwy wodonośnej i wyników analizy chemiczno-bakteriologicznej, określanych w badaniach na etapie wstępnej realizacji projektu;
- typu i konstrukcji studni;
- metod wiercenia;
- hydrogeologicznych i geologicznych warunków w zakresie wiercenia;
- wykorzystanych technologii i materiałów;
- warunków eksploatacji;
- terminowości obsługi technicznej i remontów.

Na długość życia studni głębinowych wpływają: błędy projektowania, niewłaściwe technologie wiercenia, nieprawidłowy dobór wyposażenia studni lub urządzeń pompowych.

## Analiza okresów eksploatacji studni głębinowych i określenie racjonalnych czasów między remontami

Dla oceny czasu eksploatacji studni głębinowych o typowej konstrukcji w Białorusi została przeanalizowana długość pracy i przyczyny likwidacji 588 studni głębinowych, o głębokości od 27 do 100 m, pobierających wodę z dneprowsko-sożskiego horyzontu wodonośnego<sup>3</sup>. Średnia miąższość warstwy wodonośnej wynosiła od 14 do 48 m i składała się z piasku i żwiru o różnym uziarnieniu.

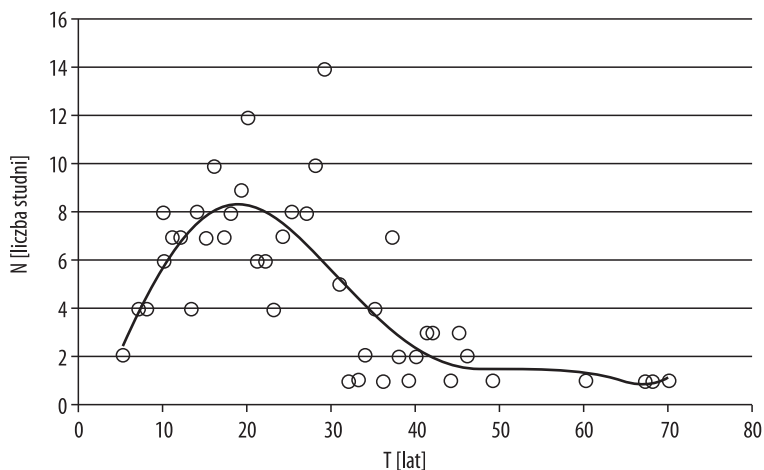
Wśród wszystkich analizowanych studni najstarsza została wykonana w 1932 roku, a 224 studnie zostały już zlikwidowane. Krzywa zależności liczby studni od czasu ich eksploatacji (rysunek 3) charakteryzuje się stromą lewą i łagodnie położoną prawą gałęzią, jak również obecnością maksimum w przedziale 16-20 lat.

Wiek średni 380 działających studni równa się 25,3 lata, maksymalny – 70 lat i minimalny – 6 lat. 43 studnie pracują bez remontu, ich wiek średni to 14,5 lat, minimalny – 5 lat i maksymalny – 42 lata.

Większość spośród zlikwidowanych studni miała głębokość do 100 m, a długość ich cyklu życia nie przekraczała 20 lat. Maksymalna wydajność jednostkowa wynosiła do 40 m<sup>3</sup>/h/m, średnia – 18 m<sup>3</sup>/h/m i minimalna – 1 m<sup>3</sup>/h/m. Najdłużej

<sup>3</sup> А. М.Шейко і ін., *Прогноз кольматажа скважин і определение рациональных сроков их регенерации*, „Вестник БрГТУ” 2006 nr 2(38); В.В. Ивашечкин, *Газоимпульсная технология восстановления пропускной способности фильтров водозаборных скважин*, А.Д. Гуриновича, Минск: БНТУ 2005.

Rysunek 3  
Krywa liczebności studni względem okresu eksploatacji



Źródło: opracowanie własne na podstawie: A. M.Шейко, i in., *Прогноз кольматажа скважин и определение рациональных сроков их регенерации*, „Вестник БрГТУ” 2006 nr 2(38); В.В. Ивашечкин, *Газоимпульсная технология восстановления пропускной способности фильтров водозаборных скважин*, А.Д. Гуриновича, Минск: БНТУ 2005.

pracowały studnie z filtrami siatkowymi (20-30 lat) oraz z rurami perforowanymi i filtrami studniowymi owiniętymi drutem z obsypką żwirową (20-25 lata). Podstawowymi przyczynami ich likwidacji była kolmatacja filtrów i wynos piasku.

Wśród analizowanych 49 studni z filtrami siatkowymi 41 miało średni czas życia wynoszący 26 lat. Dla 8 studni niezbędne było przeprowadzenie remontów, a ich średni okres eksploatacji wyniósł 43 lata.

Ze 154 przeanalizowanych studni z filtrami studniowymi z nawiniętym drutem i obsypką żwirową 86 zlikwidowano po średnim czasie eksploatacji wynoszącym 21 lat. Remonty były realizowane dla 68 studni, co zwiększyło ich średni czas pracy do 35 lat. Tylko 1 studnia pracuje bez remontów przez 32 lata.

W procesie eksploatacji odbywa się intensywne fizykochemiczna i mikrobiologiczna kolmatacja filtra oraz strefy przyotworowej. Zjawisko to jest główną przyczyną skrócenia cyklu życia studni i niskiej efektywności prac renowacyjnych. Kolmatacja w warstwie wodonośnej zachodzi przede wszystkim na skutek osadzania się na filtrze trudno rozpuszczalnych związków żelaza i manganu.

Wśród 213 przebadanych studni wyposażonych w filtry rurowe perforowane z nawiniętym drutem i obsypką żwirową 23 zostały zamknięte po średnio 19 latach eksploatacji, dla 148 studni był przeprowadzony remont po okresie eksploatacji wynoszącym średnio 22 lata, natomiast 42 studnie pracują bez remontów przez 13 lat.

Proces kolmatacji filtrów i strefy przyfiltrów studni, polegający na stopniowym (ale z różną intensywnością) odkładaniu się osadów mineralnych, powoduje

je zmniejszanie się powierzchni otworów filtru i porowatości warstwy w strefie przyfiltrkowej, jak również współczynnika filtracji.

Wskaźnikiem sprawności studni jest jej aktualna wydajność jednostkowa „ $q$ ”, która określa wydajność studni w litrach z 1 m depresji w ciągu 1 godziny. Wiadomo, że opór związany z dopływem wody do studni, spowodowany chemiczną kolmatacją filtra i strefy przyfiltrkowej, zmienia się w przybliżeniu wykładniczo, z pewnym okresem opóźnienia<sup>4</sup>. Dla filtrów podlegających procesowi kolmatacji zmiana wydajności jednostkowej jest funkcją wykładniczą o następującej postaci<sup>5</sup>:

$$q_t = q_0 \cdot e^{-\beta t} \quad (2)$$

gdzie  $q_t$  – bieżąca wydajność jednostkowa;  $q_0$  – początkowa wydajność jednostkowa studni;  $\beta$  – współczynnik, obliczający zmiany wydajności jednostkowej studni w związku z kolmatacją (współczynnik „starzenia” studni);  $t$  – czas.

Skład chemiczny i stabilność wód podziemnych także wpływa na czas eksploatacji studni. Parametrem, który informuje o potencjalnej korozyjności wody, a także o tendencji do wytrącania osadów mineralnych, jest indeks stabilności.

W celu określenia zależności intensywności kolmatacji od stopnia korozyjnego oddziaływania wody – wskaźnika Ryznara i koncentracji żelaza przeanalizowano 179 studni (rysunek 4). Współczynniki korelacji w obu wypadkach nie przekraczają 0,08, dlatego zależność traktuje się jako nieistotną. Takie zjawisko jest prawdopodobnie związane z występującymi równocześnie procesami kolmatacji biologicznej, polegającej na nagromadzeniu produktów funkcjonowania bakterii redukujących żelazo i siarczany. W ten sposób intensywność chemicznej kolmatacji filtrów określa się nie tylko ilościowym nagromadzeniem związków żelaza, wapnia, magnezu i in., ale też ich stabilnością przy określonych wartościach pH.

Analiza wpływu metod wiercenia na wielkość współczynnika  $\beta$  przy jednokowych konstrukcjach filtrów pokazała, że wartości  $\beta$  w studniach wierconych obrotowo są 5-20% większe niż w studniach wierconych udarowo.

W tabeli 1 zestawiono obliczone wartości okresów między kolejnymi remontami studni, wyznaczone jako czas, po którym wydajność studni zmniejszy się o 25% względem początkowej wydajności jednostkowej, jak również wartości współczynników „starzenia”. Średni okres międzyremontowy wyniósł 3,35 roku.

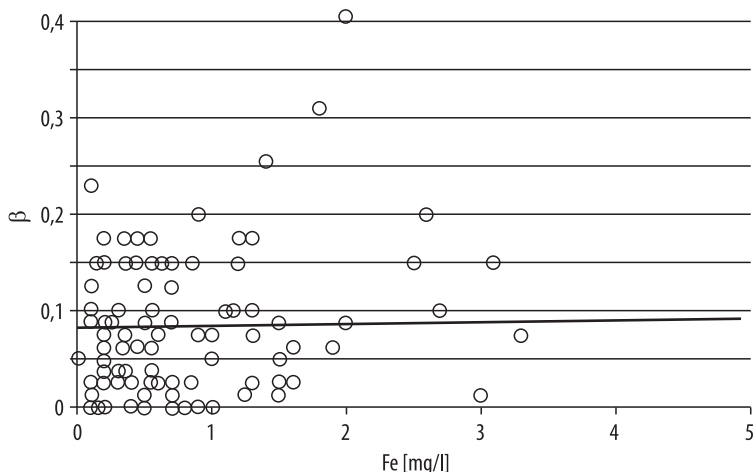
Wśród przebadanych studni pierwsze prace związane z regeneracją filtrów wykonywano przeciętnie po 14 latach od wykonania studni, przy średnim obniżeniu wydajności jednostkowej o 35-45% w stosunku do wartości pierwotnej.

Tak długi czas do pierwszej regeneracji wpływał negatywnie na efektywność prac renowacyjnych oraz ogólną długość czasu pracy studni. Główną przyczyną niskiej efektywności regeneracji filtrów studni jest fakt, że po długim okresie nieprzerwanej pracy studni zachodzi proces dehydratacji kolmatantów, powodujący

<sup>4</sup> A. М.Шейко i in., *Прогноз кольматажа...*, op. cit.

<sup>5</sup> T. Chrzan, *Kolmatacja filtrów studni głębinowych na przykładzie ujęcia wody dla Leszna*, „Inżynieria Środowiska” 2007 nr 13 (133), s. 62-67.

Rysunek 4  
Wykres zależności współczynnika „starzenia” od zawartości żelaza (Fe)



Źródło: opracowanie własne na podstawie: ibidem.

Tabela 1

Analiza wpływu metod wiercenia i konstrukcji filtrów na wartość współczynnika  $\beta$  i okresów międzyremontowych dla różnych rodzajów studni

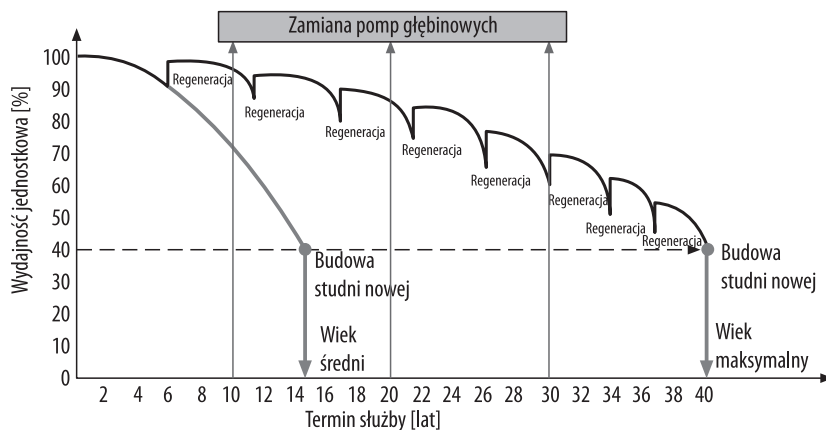
Metoda wiercenia	Wiercenie udarowe			Wiercenie obrotowe	
				z lewym obiegiem płuczki	z prawymi obiegiem płuczki
Filtr	rurowy (perforowany) z nawiniętym drutem i obsypką żwirową	rurowy (perforowany) z nawiniętym drutem	studniowy z nawiniętym drutem i z obsypką żwirową	studniowy z nawiniętym drutem i z obsypką żwirową	rurowy (perforowany) z nawiniętym drutem
Współczynnik „starzenia” $\beta$	0,099	0,077	0,139	0,115	0,068
Okres międzyremontowy (czas do regeneracji), lata	2,9	3,7	2,1	2,5	4,2

Źródło: opracowanie własne.

ich wzmocnienie i trudności z usunięciem. Ze spadkiem wydajności jednostkowej studni znacząco rośnie zużycie energii elektrycznej potrzebnej do wypompowania. Przy realizacji regulaminów regeneracji filtrowy okres cyklu życia studni może znacznie wzrastać co ponad 40 lat (rysunek 5).



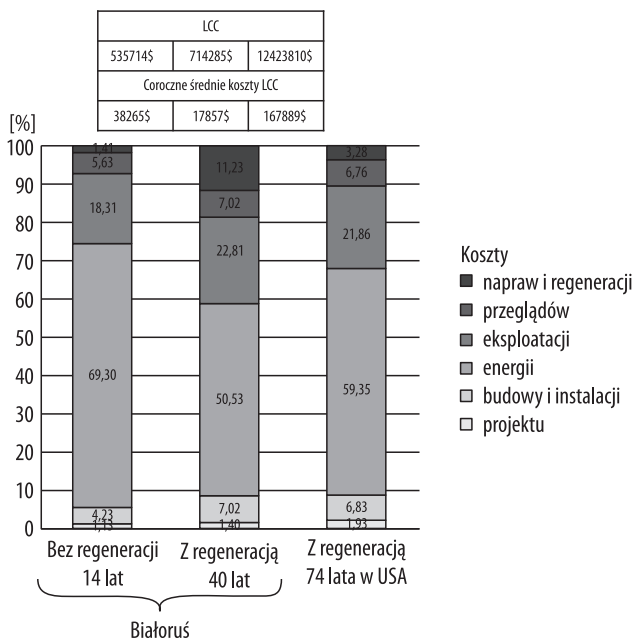
Rysunek 5  
Wykres zależności wydajności jednostkowej od okresu eksploatacji studni



- 1 – bez przeprowadzenia regeneracji,
- 2 – z regeneracją przez określony międzyremontowy okres.

Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 6  
Koszty w poszczególnych fazach cyklu życia studni



Źródło: opracowanie własne na podstawie: A. М.Шейко i in., *Прогноз кольматажа... op. cit.*; F. Marvin, R. Glotfelty, *McElhiney Lecture: Life-Cycle Economic Analysis of Water Wells-Considerations for Design*, 2012, www.groundh2o.org [10-01-2013].

Przeprowadzone na rysunku 6 porównawcze obliczenia kosztów cyklu życia studni w Białorusi i USA<sup>6</sup> pokazują, że główne znaczenie mają koszty energii elektrycznej, które w znacznej mierze zależą od jakości realizacji prac, od regeneracji i stosowanych konstrukcji filtrów.

## Podsumowanie

Prawidłowo zaprojektowana, wykonana i eksploatowana studnia, poddawana regularnym zabiegom konserwacji i regeneracji, powinna sprawnie działać 40-70 lat z minimalnymi kosztami cyklu życia.

Przedłużenie okresu eksploatacji studni głębinowych można uzyskać dzięki przeprowadzaniu we właściwym czasie ich profilaktycznych, okresowych regeneracji, z częstotliwością nie przekraczającą międzyremontowych terminów regeneracji. Przy wyznaczaniu racjonalnego międzyremontowego terminu regeneracji należy uwzględnić warunki naturalne danej studni, charakterystyki eksploatacyjne i stan określany przez obserwację w ciągu całego okresu eksploatacji.

---

<sup>6</sup> Pump Life Cycle Costs: A Guide to LCC Analysis for Pumping Systems. Executive Summary, Office of Industrial Technologies U.S. Department of Energy, Hydraulic Institute, Europump, 2006; F. Marvin, R. Glotfelty, *McEllhiney Lecture: Life-Cycle Economic Analysis of Water Wells-Considerations for Design*, 2012, [www.groundh2o.org](http://www.groundh2o.org) [10-01-2013].