

CAŁKOWITA WYSOKOŚĆ PODNOSZENIA UKŁADU POMPOWEGO

Poprawnie wyznaczona pozwala minimalizować koszty cyklu życia (LCC)

mgr inż. Marek Świdorski
KSB Pompy i Armatura Spółka z o.o.
Warszawa
Oddział we Wrocławiu

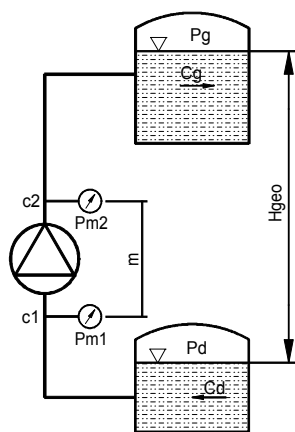
POMPY POMPOWNI
Nr 1/112 luty 2004

CAŁKOWITA WYSOKOŚĆ PODNOSZENIA UKŁADU POMPOWEGO

Poprawnie wyznaczona pozwala minimalizować koszty cyklu życia (LCC)

Powszechnie obecnie dążenie do minimalizacji całkowitych kosztów życia układu pompowego w przewidywanym czasie jego użytkowania (LCC) wymaga dokładnej analizy wszystkich składników mających wpływ na wielkość ponoszonych kosztów. Jednym z głównych składników jest koszt energii elektrycznej zużywanej w procesie pompowania [1]. Zapotrzebowanie energii elektrycznej uzależnione jest od wydajności i całkowitej wysokości podnoszenia układu pompowego, gęstości pompowanego czynnika oraz całkowitej sprawności agregatu pompowego¹. W większości przypadków wydajność jest ściśle określona wymaganiami realizowanego procesu technologicznego, podobnie gęstość cieczy. Dwa pozostałe czynniki nie są już tak jednoznaczne. Właściwie wyznaczona całkowita wysokość podnoszenia pozwala dobrać dla ustalonej wydajności odpowiednią pompę o najwyższej sprawności. Aby to było możliwe konieczna jest poprawna identyfikacja układu pompowego, zarówno pod względem wysokości statycznych (w tym geometrycznych) jak też wysokości dynamicznych.

W praktyce inżynierskiej często pojawiają się problemy związane z poprawnym określeniem całkowitej wysokości podnoszenia. Czasami mylone są ze sobą całkowite wysokości podnoszenia układu i pompy. W zasadzie są to równoznaczne pojęcia ale inaczej wyrażone i mające inne odniesienia. Warto więc przypomnieć podstawowe relacje określające całkowitą (efektywną, użyteczną) wysokość podnoszenia układu pompowego i pompy [2, 3, 4].



Rys. 1 Schemat układu pompowego

Całkowita (efektywna, użyteczna) wysokość podnoszenia układu pompowego wyraża się wzorem:

$$H_e = H_{stat} + H_{dyn} \quad (1)$$

w którym:

- statyczna wysokość podnoszenia dla układu pompowego:

$$H_{stat} = \left[H_{geo} + \frac{P_g - P_d}{\rho g} \right] \quad (1a)$$

- dynamiczna wysokość podnoszenia dla układu pompowego:

$$H_{dyn} = \left[\Sigma h_{str}^S + \Sigma h_{str}^T \right] + \left(\frac{c_g^2 - c_d^2}{2g} \right) \quad (1b)$$

gdzie (Rys. 1):

H_{geo} – geometryczna wysokość podnoszenia [m]
 p – ciśnienie w zbiorniku [Pa]

Σh_{str} – sumaryczna wysokość strat w rurociągu [m]

c – prędkość przepływu cieczy [m/s]

ρ – gęstość pompowanej cieczy [kg/m³]

$g = 9,80665 \text{ m/s}^2$

Indeksy dolne:

g – zbiornik górny

d – zbiornik dolny

Indeksy górne:

S – przewód ssawny

T – przewód tłoczny

Występująca w równaniu (1b) różnica kwadratów prędkości przepływu w obu zbiornikach ze względu na swoją znikomą wartość jest zwykle pomijana w obliczeniach.

Całkowita (użyteczna, efektywna) wysokość podnoszenia pompy wyraża się natomiast następującym wzorem:

$$H_e = \frac{p_{m2} - p_{m1}}{\rho g} + m + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2g} \quad (2)$$

gdzie:

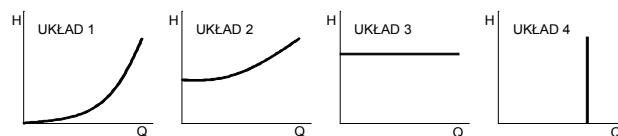
c – prędkość przepływu w pomiarowym przekroju tłoczny (2) i ssawny (1) [m/s]

m – różnica wysokości położenia manometrów tłoczny i ssawny [m]

p_m – ciśnienie wskazywane przez manometry tłoczny (2) i ssawny (1) [Pa]

Regułą jest, że w ustalonym punkcie pracy pompy w układzie pompowym całkowita wysokość podnoszenia pompy i układu są sobie równe.

Wysokość podnoszenia zależy także od wydajności a funkcja opisująca tę zależność traktowana jest jako charakterystyka układu pompowego. Dla zobrazowania tego zagadnienia należy przypomnieć najczęściej występujące przypadki charakterystyk układów pompowych [5, 6].



W układzie 1 całkowita wysokość podnoszenia zmienia się wraz ze zmianą wydajności. Wysokość statyczna (geometryczna) nie występuje lub ma znikomą wartość. Typowe przykłady to:

- układ cyrkulacji cieczy w obiegach ogrzewania lub chłodzenia,
- układ zasilania zbiornika otwartego leżącego w dużej odległości od pompy przy braku (lub przy znikomej) geometrycznej wysokości podnoszenia.

W układzie 2 całkowita wysokość podnoszenia także zmienia się ze zmianą wydajności. Występuje tutaj jednak statyczna wysokość podnoszenia. Przykładem jest:

- układ napełniania zbiornika otwartego leżącego w dużej odległości od pompy przy znacznej geometrycznej wysokości podnoszenia a także wtedy, gdy występują

¹ A także przyspieszenia grawitacyjnego (np. przyspieszenie ziemskiego pola grawitacyjnego)

różnice ciśnień statycznych pomiędzy zbiornikiem górnym i dolnym.

W układzie 3 całkowita wysokość podnoszenia pozostaje stała niezależnie od zmian wydajności. Wysokość geometryczna może być dużo mniejsza od różnicy ciśnień statycznych a straty są niewielkie. Typowe przykłady to:

- układ utrzymujący ciśnienie w wydzielonym odcinku sieci wodociągowej o zróżnicowanych rozbiorach wody,
- układ zasilania kotła parowego o stałym ciśnieniu roboczym ze zmieniającym się zapotrzebowaniem na parę,
- układ napełniania otwartego zbiornika od góry.

W układzie 4 całkowita wysokość podnoszenia zmienia się przy ustalonej wartości wydajności. Typowe przykłady to:

- układ napełniania zbiornika otwartego od dołu,
- próba wykorzystania pompy odśrodkowej do zasilania hydroakumulatora (jednak jeśli wydajność jest mniejsza niż 1,25 l/s, to lepsze będzie w takim przypadku zastosowanie pompy wyporowej [6]).

Całkowita wysokość podnoszenia układu pompowego stanowi sumę wysokości statycznej i dynamicznej. Z równań (1a) i (1b) wynika, że na całkowitą wysokość podnoszenia ma wpływ:

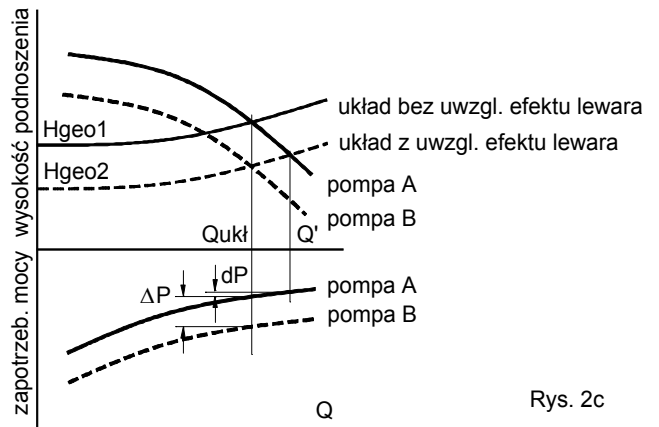
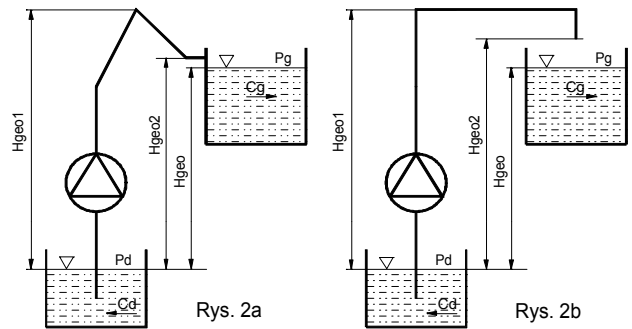
- wysokość geometryczna,
- różnica ciśnień pomiędzy zbiornikami górnym i dolnym (lub pomiędzy zbiornikiem dolnym a punktem wpięcia do ciśnieniowej części rurociągu tłocznego),
- wielkość strat w układzie pompowym.

Która z tych wielkości ma dominujący wpływ zależy w dużej mierze od konfiguracji układu pompowego i jego przeznaczenia. Dla uzyskania oszczędności w kosztach energii pompowania wskazana jest minimalizacja każdej z tych wielkości. Warto pamiętać, że „Wymaganą całkowitą wysokość podnoszenia można zmniejszyć obniżając:

- statyczną wysokość podnoszenia (mniejsze wymagane przeciwcisnienia np. filtrów ; mniejsze wysokości geometryczne pomiędzy poziomami cieczy w zbiornikach ssawnym i tłocznym, wykorzystanie efektu lewarowego),
- dynamiczną wysokość podnoszenia (mniejsze straty poprzez zastosowanie rur o większych średnicach i armatury o mniejszych współczynnikach strat, eliminację zaworów dławieniowych) [7]”.

Spełnienie powyższego postulatu może być trudne ale jest wykonalne. Wymaga doświadczenia projektanta oraz odpowiedzialności użytkownika za prawidłowe określenie wymagań co do warunków pracy instalacji.

Wysokość statyczna w otwartych układach pompowych (ciśnienie atmosferyczne w otwartych zbiornikach dolnym i górnym) ogranicza się jedynie do wysokości geometrycznej, która definiowana jest jako różnica rzędnych (niwelacji) pomiędzy poziomem cieczy w zbiorniku górnym i dolnym [2, 3, 4]. Czy zawsze należy dosłownie traktować tę definicję ? W pewnych przypadkach nie. Jak poprawnie określić wysokość geometryczną gdy rurociąg tłoczny wznosi się do pewnego maksymalnego punktu swojego profilu a następnie opada ku zbiornikowi górnemu i wylot rurociągu do zbiornika znajduje się powyżej maksymalnego poziomu znajdującej się w nim cieczy ? (Rys. 2a, 2b)

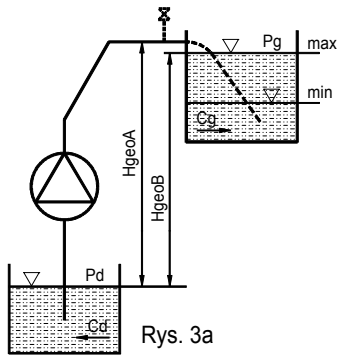


Często za wysokość geometryczną przyjmuje się różnicę wysokości pomiędzy rzędną maksymalnego punktu rurociągu a rzędną poziomu cieczy w zbiorniku dolnym (H_{geo1}) zapominając o efekcie działania lewara². Takie podejście w swoich skutkach powoduje dobór pompy na wyższe wysokości podnoszenia niż występują w rzeczywistości (oczywiście, jeśli efekt lewarowy w rurociągu rzeczywiście wystąpi a to wymaga sprawdzenia obliczeniowego). W konsekwencji wystąpi wzrost rzeczywistej wydajności i zwiększone zapotrzebowanie mocy pompy (Rys. 2c – pompa A). Wykorzystanie efektu lewarowego pozwala dla wymaganej wydajności układu na obniżenie wysokości podnoszenia i obniżenie zapotrzebowania mocy pompy (Rys. 2c – pompa B). Ciekawy przykład obliczeniowy wyjaśniający problem konfiguracji rurociągu tłocznego z działaniem efektu lewarowego opisany jest szczegółowo w [8].

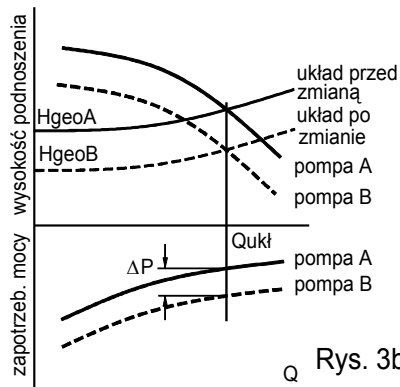
Inny przypadek to sytuacja gdy rurociąg tłoczny stale się wznosi i ma wylot do zbiornika górnego powyżej poziomu cieczy w nim zawartej (Rys. 3a). Wysokość geometryczna jest wtedy liczona od poziomu cieczy w zbiorniku dolnym do osi rurociągu w punkcie wypływu do zbiornika (H_{geoA}). Czy pompowanie będzie efektywne gdy poziom cieczy w zbiorniku górnym ma ustaloną wartość poniżej wylotu z rurociągu (np. jest to w miarę stały poziom kanału odpływowego w przypadku pompowni melioracyjnej) ? A może lepiej zanurzyć wylot rurociągu poniżej poziomu minimalnego w zbiorniku górnym (pamiętając o umieszczeniu zaworu odpowietrzająco-napowietrzającego w najwyższym punkcie rurociągu) ? Pozwoli to dla wymaganej wydajności układu obniżyć wysokość geometryczną³ a tym samym całkowitą wysokość podnoszenia i zapotrzebowanie mocy przez pompę (Rys. 3b – pompa B).

² Można to w pewnych przypadkach zaakceptować, np. jeśli różnica wysokości pomiędzy rzędną maksymalnego punktu rurociągu a rzędną wylotu z rurociągu do zbiornika górnego jest większa niż 10 m i w opadającej gałęzi rurociągu nie ma zapewnionej ciągłości przepływu jego pełnym przekrojem [6] – brak efektu lewara.

³ W tym przypadku odpowiada ona definicji wysokości geometrycznej.



Rys. 3a



Rys. 3b

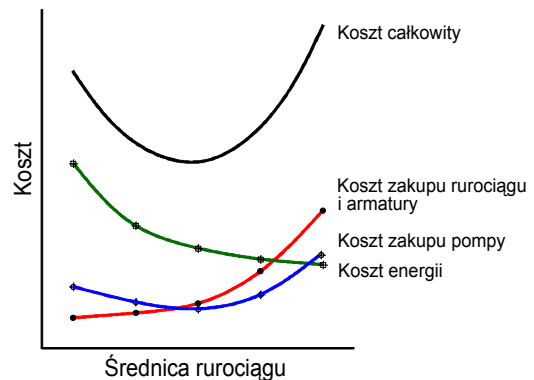
Określenie wysokości statycznej w układach ciśnieniowych (ciśnienie w zbiorniku dolnym i górnym jest różne od atmosferycznego) wymaga głębszej analizy przeznaczenia układu pompowego. Konieczne jest zidentyfikowanie rzeczywiście występujących ciśnień w obu lub jednym zbiorniku (lub w punkcie wpięcia rurociągu prowadzonego od pompy do kolektora ciśnieniowego) [5]. W projekcie układu możliwe jest tylko założenie ich wartości w oparciu o wymagania procesu. Jednak gdy wymagana jest poprawa istniejącego układu nie obejdzie się bez dodatkowych pomiarów ciśnień i dopiero po nich wykonaniu można przystąpić do korekty parametrów istniejących lub doboru nowych pomp. Celowe jest minimalizowanie wartości przeciwcisnienia dostosowane jednakże do wymagań narzuconych realizowanym procesem (wymagana jest optymalizacja procesu pod względem jego parametrów). Ze względu na znaczną różnorodność ciśnieniowych układów pompowych (wodociągowe, ciepłownicze, przemysłowe, energetyczne) bardziej obszernie rozwinięcie tego zagadnienia jest tutaj pominięte.

Dynamiczna wysokość podnoszenia to wyłącznie straty przepływu generowane w układzie pompowym. Na ich wielkość mają wpływ:

- średnice rurociągu,
- długość rurociągu,
- ilość i rodzaj zainstalowanej armatury i kształtek.

Na wielkość strat przy ustalonej wydajności poza średnicą wpływa także chropowatość powierzchni wewnętrznej rur (materiał a także czas użytkowania w przypadku rur starych). Nie bez znaczenia są także własności reologiczne pompowanej cieczy (gęstość, lepkość, koncentracja składnika stałego). Poprawny dobór średnicy rurociągu musi uwzględniać wielkość strat jakie wystąpią po jej zastosowaniu. Jak wiadomo, straty są tym mniejsze im większa jest średnica rurociągu. Wybór odpowiedniej średnicy rurociągu poza aspektem strat musi uwzględniać warunki realizacji procesu pompowania. W pewnych przypadkach (np. kanalizacja ciśnieniowa, hydrotransport), nadmierny wzrost średnicy rurociągu dla wymaganej

wydajności powoduje, że przepływ odbywa się z prędkościami mniejszymi od prędkości krytycznej⁴ co w skrajnym przypadku może doprowadzić do zatykania się rur. Na długość rurociągu z reguły nie mamy wpływu, jest wymuszona odległością pomiędzy zbiornikami. Wskazane jest jednak poprowadzenie go po możliwie najkrótszej trasie. Rodzaj i ilość armatury powinny zostać ograniczone do niezbędnego wymaganego minimum (zawory zwrotne, odcinające, regulacyjne⁵), podobnie różnego rodzaju kształtki (kolana, dyfuzory, itp.). Armatura i kształtki powinny cechować się minimalnymi współczynnikami strat. Optymalnie dobrana średnica rurociągu pozwala zminimalizować całkowite koszty układu pompowego (Rys. 4).

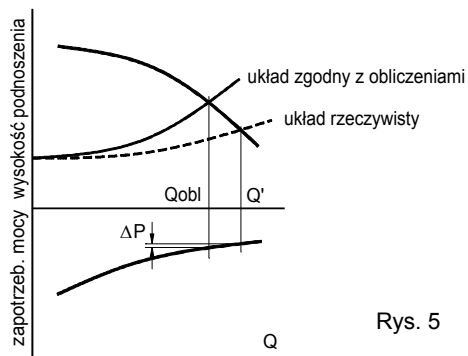


Rys. 4 Wpływ średnicy rurociągu na całkowity koszt układu pompowego [1]

Metodykę obliczania całkowitych strat w układzie pompowym opisują liczne publikacje [np. 3, 8, 9]. Na etapie projektowania układu wymagana jest staranność i dokładność obliczeń. Stosowanie odpowiednich programów komputerowych ułatwia prowadzenie obliczeń jednak ma tę wadę, że programy te są tak dokładne jak dokładne są zgromadzone w nich odpowiednie dane pomocnicze i zastosowane procedury obliczeniowe. Obliczenie strat liniowych oparte wyłącznie na nomogramach prowadzi do mniej dokładnych wyników (można je stosować do szacunkowych, wstępnych obliczeń strat). Obliczenie strat miejscowych (armatura, kształtki) w praktyce inżynierskiej bywa oparte na założeniu, że stanowią one 15 ÷ 20 % wartości strat liniowych. Dla bardzo długich rurociągów gdzie dominują straty liniowe jest to jeszcze do przyjęcia, ale powinno zostać zweryfikowane obliczeniami. Jednak w przypadku krótkich rurociągów zawierających większą liczbę armatury i kształtek, gdzie dominują straty miejscowe wskazane jest ich obliczenie. Wyznaczenie strat w złożonych układach pompowych (np. współpraca równoległa kilku pomp oddalonych od siebie lub rozgałęzione rurociągi tłoczne) jest zadaniem skomplikowanym i wymaga dużego doświadczenia od prowadzącego obliczenia. Rezultatem niedokładnie lub błędnie przeprowadzonych obliczeń jest często zawyżona wysokość dynamiczna a tym samym całkowita wysokość podnoszenia. W rzeczywistości w trakcie użytkowania dobranej pompy uzyskuje się z reguły mniejsze niż zakładano całkowite wysokości podnoszenia, większą wydajność i większe zapotrzebowanie mocy (Rys. 5).

⁴ Minimalna prędkość przepływu przy której nie następuje jeszcze wytrącanie się cząstek ciał stałych unoszonych w strumieniu cieczy.

⁵ Jeśli są konieczne. Zamiast nich należy rozważyć możliwość zastosowania regulacji przez zmianę obrotów pompy.



Rys. 5

Poprawnie wyznaczona i sprowadzona do niezbędnego minimum całkowita wysokość podnoszenia układu dla wymaganej wydajności wyznacza punkt pracy poszukiwanej pompy. Zasadą jest, że dla wybranej pompy punkt pracy powinien leżeć najbliżej jej punktu maksymalnej sprawności. Tak dobrana pompa gwarantuje niskie jednostkowe zużycie energii.

Minimalizacja całkowitej wysokości podnoszenia dla wymaganej wydajności pozwala na wybór pompy o mniejszej mocy napędu, mniejszych gabarytach oraz co najważniejsze niższej cenie zakupu. Niski pobór energii zapewnia niższe koszty użytkowania w przewidywanym czasie pracy pompy w układzie.

Bibliografia

- [1] – Frenning L., Alfredsson K., Hovstadius G.: *Pump Life Cycle Cost. A Guide to LCC Analysis for Pumping System*. Hydraulic Institute/EUROPUMP, January 2001
- [2] – Troskołański A.T., Łazarkiewicz S.: *Pompy wirowe*. WNT, Warszawa 1973
- [3] – Stępniewski M.: *Pompy*. WNT, Warszawa 1978
- [4] – Jędrał W.: *Pompy wirowe*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001
- [5] – Wowk J.: *Pompownie. Poradnik dla projektantów, inwestorów i użytkowników*. WNT, Warszawa 2003
- [6] – Mc Nally W.: *Technical Papers*. The Mc Nally Institute, Clearwater, FL, USA, 2002
- [7] – Świdorski M.: *Siedem sposobów na oszczędzanie energii pompowania. Praktyczne wskazówki*. POMPY POMPOWNIE, nr 4/111/2003, str. 25÷28, Wrocław 2003
- [8] – Korczak A., Rokita J.: *Pompy i układy pompowe – obliczenia i projektowanie*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998
- [9] – Grabarczyk C.: *Przepływy cieczy w przewodach. Metody obliczeniowe*. ENVIROTECH, Poznań 1997

Autor: mgr inż. Marek Świdorski,
KSB Pompy i Armatura Sp. z o.o., Warszawa,
Oddział we Wrocławiu

Kontakt: e-mail: iw-wr@ksb.pl, spmws@wp.pl