

ANDRZEJ KORCZAK, JERZY ROKITA

Katedra Maszyn Hydraulicznych i Powietrznych

ANALIZA PRACY MODELU URZĄDZENIA
HYDROFOROWEGO

Streszczenie. W pracy rozważano układy pompowe współpracujące ze zbiornikami zamkniętymi, z których w trakcie napełniania następuje odpływ cieczy. Układ taki stanowi model urządzenia hydroforowego. Przeanalizowano wpływ wielkości charakterystycznych układu na wielkość czasu cyklu pracy, zużycie energii i sprawność układu. Podano przykład liczbowy.

1. Wstęp

W praktyce często występuje przypadek współpracy pompy wirowej ze zbiornikiem zamkniętym, w którym panuje ciśnienie zmienne w czasie pracy pompy. Pompa napełniając zbiornik powoduje podnoszenie się poziomu cieczy w zbiorniku i równocześnie spręża gaz znajdujący się nad jej poziomem. Energia zawarta w sprężonym gazie może zostać wykorzystana do przetłaczania cieczy ze zbiornika w określone miejsce. Stanowi to zasadę działania wszelkich instalacji hydroforowych [1].

W pracy [2] rozważono przypadek współpracy pompy wirowej ze zbiornikiem zamkniętym, przy założeniu, że w trakcie pracy pompy nie występuje odpływ cieczy ze zbiornika. W praktyce najczęściej jednak występuje przypadek, gdy w trakcie napełniania zbiornika występuje równoczesny odpływ cieczy. Odpływ ten może występować stale lub w określonych okresach. Taki układ stanowi przykład urządzenia hydroforowego, a ze względu na szeroki zakres stosowania zasługuje na szczególne rozważenie.

Podobnie jak w pracach [2], [3] założono, że w układzie zainstalowana jest pompa wirowa (pobierająca ciecz z otwartego zbiornika dolnego o stałym poziomie zwierciadła), której cha-

rakterystykę przepływu w zakresie pracy układu opisano równaniem:

$$H_p = H_0 - A Q^2 \quad (1)$$

gdzie:

H_p - użyteczna wysokość podnoszenia pompy,

H_0, A - stałe charakterystyczne pompy,

Q - wydajność.

Charakterystykę mocy na wale pompy opisano w zakresie pracy układu równaniem liniowym:

$$N = N_0 + B Q \quad (2)$$

gdzie:

N - moc na wale pompy,

N_0, B - stałe charakterystyczne pompy.

Charakterystykę instalacji pompowej opisano równaniem:

$$H_r = H_g + \frac{p_g - p_d}{\gamma} + C Q^2 \quad (3)$$

gdzie:

H_r - wysokość podnoszenia układu pompowego,

H_g - geometryczna wysokość podnoszenia układu pompowego,

p_g - ciśnienie nad zwierciadłem cieczy w zbiorniku górnym,

p_d - ciśnienie nad zwierciadłem cieczy w zbiorniku dolnym,

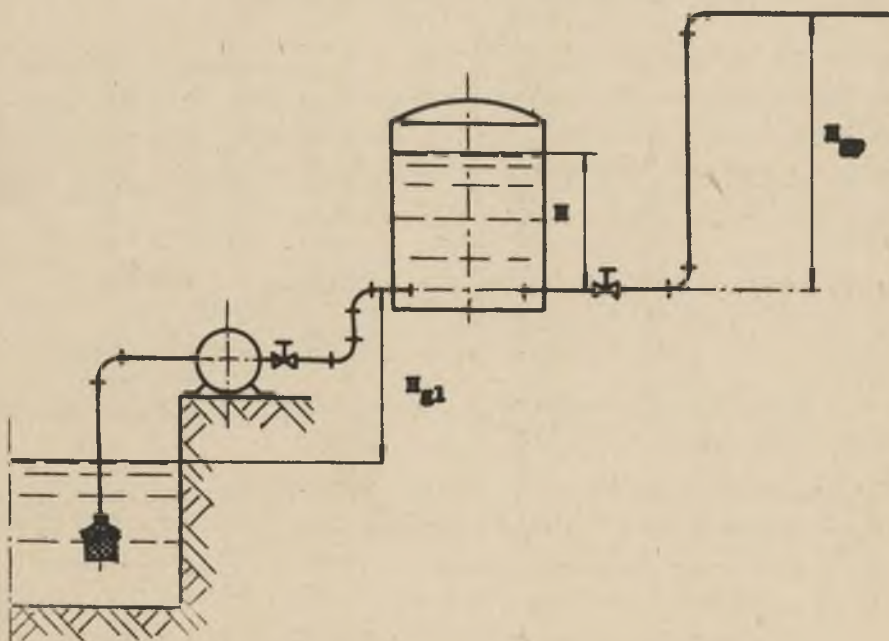
C - współczynnik charakterystyczny układu pompowego,

γ - ciężar właściwy cieczy.

Założono również, że w zbiorniku znajduje się stała masa gazu doskonałego, podlegającego w trakcie sprężania przemianie izotermicznej.

2. Czas napełniania zbiornika

W pracach [2], [3] wykazano, że najkorzystniejszym przypadkiem ruchowym jest zainstalowanie wypływu przewodu tłocznego do zbiornika co najwyżej na wysokości najniższego położenia zwierciadła cieczy, co powoduje pracę pompy przy zmiennej geometrycznej wysokości podnoszenia układu, a w konsekwencji skraca czas napełniania i doprowadza do obniżenia zużycia energii przez pompę. Dlatego też dalsze rozważania dotyczyć będą tego właśnie przypadku. Schemat układu przedstawiono na rys.1. Układ ten jest modelem urządzenia hydroforowego.



Rys. 1. Schemat modelu urządzenia hydroforowego

2.1. Napełnianie zbiornika przy nieprzerwanym odpływie cieczy

Założono, że w trakcie napełniania zbiornika występuje nieprzerwany w czasie odpływ cieczy. Charakterystykę instalacji pompowej opisano (rys. 1) równaniem:

$$H_r = H + H_{gl} + \frac{p - p_{at}}{\gamma} + C Q^2 \quad (4)$$

gdzie:

p - chwilowa wartość ciśnienia nad zwierciadłem cieczy w zbiorniku,

p_{at} - ciśnienie otoczenia (atmosferyczne).

Pozostałe oznaczenia podano na rys. 1. Zakładając, że przy dolnym położeniu zwierciadła cieczy w zbiorniku objętość gazu wynosiła V_0 , przy ciśnieniu p_0 , po podniesieniu się poziomu cieczy w zbiorniku o wysokość H , chwilowe ciśnienie gazu wyniesie:

$$p = p_0 \frac{V_0}{V_0 - F H} \quad (5)$$

gdzie:

F - powierzchnia przekroju poprzecznego zbiornika, przyjęta jako stała.

Charakterystykę przewodu rurowego przez który następuje odpływ cieczy ze zbiornika, opisano równaniem:

$$H_{pr} = H_{gp} + C_p Q_p^2 \quad (6)$$

gdzie:

H_{pr} - wysokość podnoszenia potrzebna do pokonania wysokości geometrycznej i oporów hydraulicznych przewodu,

H_{gp} - geometryczna wysokość podnoszenia przewodu,

Q_p - natężenie przepływu cieczy w przewodzie,

C_p - współczynnik charakterystyczny dla danego przewodu.

Z zależności (1), (4), (5) wynika, że chwilowa wydajność pompy wyniesie:

$$Q = \sqrt{\frac{H_0 - H_{gl} - H + \frac{P_{at}}{\gamma} - \frac{P_0}{\gamma} \cdot \frac{V_0}{V_0 - F H}}{A + C}} \quad (7)$$

przy czym z zależności (7) wynika, że wydajność pompy zmniejsza się w miarę podnoszenia się poziomu zwierciadła cieczy w zbiorniku.

Chwilowe natężenie przepływu cieczy w przewodzie odpływowym wyniesie:

$$Q_p = \sqrt{\frac{H - H_{gp} - \frac{P_{at}}{\gamma} + \frac{P_0}{\gamma} \cdot \frac{V_0}{V_0 - F H}}{C_p}} \quad (8)$$

Z zależności (8) wynika, że natężenie przepływu cieczy w przewodzie odpływowym wzrasta w miarę podnoszenia się poziomu cieczy w zbiorniku.

Zgodnie z oznaczeniami według rys.1, przyrost wysokości podnoszenia zwierciadła cieczy w czasie dt , wyniesie:

$$dH = \frac{Q - Q_p}{F} dt \quad (9)$$

a stąd

$$dt = \frac{F}{Q - Q_p} dH \quad (10)$$

Czas napełniania zbiornika do wysokości H , wyniesie:

$$t = F \int_0^H \frac{dH}{Q - Q_p} \quad (11)$$

gdzie:

Q i Q_p określone są zależnościami (7) i (8).

Aby całka (11) posiadała wartość skończoną, w przedziale $(0, H)$ musi być spełniony warunek:

$$Q(H) > Q_p(H)$$

Oznacza to, że minimalna wydajność pompy w trakcie napełniania zbiornika (w końcowym momencie pracy) musi być co najmniej równa maksymalnemu natężeniu przepływu cieczy w przewodzie odpływowym.

Całkę (11) można rozwiązać w zasadzie wyłącznie numerycznie. Ze względu na łatwość analizy, wyniki obliczeń najkorzystniej jest przedstawić w postaci wykresu funkcji $t = f(H)$.

2.2. Napełnianie zbiornika przy okresowym odpływie cieczy

W odróżnieniu od przypadku rozważanego poprzednio założono, że odpływ cieczy z zbiornika w trakcie napełniania występuje jedynie okresowo. Aby przypadek ten potraktować ogólnie, przyjęto że proces napełniania zbiornika składać się będzie z trzech faz:

- napełnianie zbiornika do wysokości H_1 (lub w czasie t_1) bez odpływu cieczy,
- napełnianie zbiornika od wysokości H_1 do H_2 (lub od czasu t_1 do t_2) z równoczesnym odpływem cieczy,
- napełnianie zbiornika od wysokości H_2 do H (lub od czasu t_2 do t) bez odpływu cieczy.

Wykorzystując związek (10) łączny czas napełniania zbiornika można określić z wzoru:

$$t = F \left[\int_0^{H_1} \frac{dH}{Q} + \int_{H_2}^H \frac{dH}{Q} \right] + F \int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{Q - Q_p} \quad (12)$$

W zależności (12) pierwszy człon określa sumę czasów składowych napełniania zbiornika (w odpowiednich przedziałach wysokości położenia poziomu cieczy) bez odpływu cieczy, czyli dla $Q_p =$

= 0, natomiast drugi określa czas napełniania zbiornika (w odpowiednim przedziale wysokości położenia poziomu cieczy) z jednoczesnym odpływem cieczy. Sposób obliczenia czasu napełniania zbiornika zamkniętego, bez jednoczesnego odpływu cieczy podano w pracy [2].

Podany sposób umożliwia określenie czasu napełniania zbiornika, przy okresowo dowolnym jednoczesnym odpływie cieczy.

3. Czas cyklu pracy układu

Po napełnieniu zbiornika, następuje wyłączenie pompy i zbiornik zostaje opróżniony przez przewód odpływowy. Powtórne załączenie pompy nastąpi dopiero po obniżeniu się poziomu cieczy do dolnego położenia. Czas cyklu pracy układu T , można przedstawić jako sumę czasów napełniania t i opróżniania t_0 .

$$T = t + t_0 \quad (13)$$

Sposób obliczenia czasu opróżniania zbiornika podano w pracy [2].

4. Analiza cyklu pracy układu

Na wielkość czasu cyklu pracy układu mają wpływ: wielkości charakterystyczne zbiornika (F , H , V_0 , p_0), wielkości charakterystyczne pompy (H_0 , A) oraz wielkości charakterystyczne układu (γ , p_{at} , H_{g1} , H_{gp} , C , C_p).

Dla konkretnego układu wymienione wielkości charakterystyczne są stałe, z wyjątkiem wielkości C i C_p , zależnych od stopnia otwarcia zasuw regulacyjnych.

Jeżeli przyjąć, że przy pełnym otwarciu zasuw regulacyjnej pompy, współczynnik C osiąga wartość minimalną $C = C_{min}$ a równocześnie czas napełniania zbiornika bez jednoczesnego odpływu cieczy osiąga wartość minimalną $t = t_{min}$, to wówczas czas napełniania zbiornika przy dowolnej wartości współczynnika C , można określić z wzoru:

$$t = t_{min} \sqrt{\frac{A + C}{A + C_{min}}} \quad (14)$$

Z zależności (14) widać, że czas napełniania zbiornika rośnie w miarę dławienia przepływu cieczy zasuwą regulacyjną.

Jeżeli również przyjmą, że przy pełnym otwarciu zasuwy na przewodzie odpływowym, współczynnik C_p osiąga wartość minimalną $C_p = C_{pmin}$, a równocześnie czas opróżniania zbiornika osiąga wartość minimalną $t_o = t_{omin}$, to czas opróżniania przy dowolnej wartości współczynnika C_p można określić z zależności:

$$t_o = t_{omin} \sqrt{\frac{C_p}{C_{pmin}}} \quad (15)$$

Z zależności (15) widać, że czas opróżniania zbiornika rośnie w miarę dławienia przepływu cieczy zasuwą.

Zależności (14) i (15) otrzymano na podstawie zależności (25) i (42), zamieszczonych w pracy [2].

W celu ułatwienia analizy zależność czasu napełniania zbiornika od wysokości napełnienia najkorzystniej jest przedstawić wykreślenie (dla różnych wartości C). Podobnie można przedstawić zależność czasu opróżniania od wysokości poziomu cieczy (dla różnych wartości C_p).

W oparciu o wykreślnie przedstawienie zależności czasów napełniania i opróżniania zbiornika można łatwiej analizować cykl pracy układu, w przypadku gdy napełnianie odbywa się bez odpływu cieczy oraz w przypadku napełniania zbiornika z okresowym odpływem cieczy.

Długości czasów składowych napełniania, gdy odpływ cieczy ze zbiornika nie występuje można wyznaczyć w oparciu o ogólną zależność

$$t = F \int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{Q} = F \int_0^{H_2} \frac{dH}{Q} - F \int_0^{H_1} \frac{dH}{Q} \quad (16)$$

gdzie Q określone jest związkem (7), a t oznacza czas napełniania w zakresie wysokości napełniania H_1 i H_2 .

Zatem czas napełniania zbiornika bez jednoczesnego odpływu w zakresie dwóch dowolnych wysokości poziomów cieczy, można wyznaczyć jako różnicę czasów napełniania do danych wysokości (licząc od dolnego położenia poziomu cieczy). Te zaś czasy można bezpośrednio odczytać z wykresu.

W celu wyznaczenia czasów składowych napełniania z jednoczesnym odpływem cieczy, można w podany powyżej sposób wykorzystać wykreślne przedstawione zależności (11). Jednakże wykres zależności (11) musi być każdorazowo wykonany dla konkretnych wartości współczynników C i C_p .

Wyżej omówione zależności graficzne mogą zostać również wykorzystane przy określaniu poziomu cieczy w zbiorniku w zależności od czasu.

Przy rozpatrywaniu warunków pracy układu, celowe jest określenie granicznej wartości $C_{p\ gr}$ (przy pozostałych wielkościach charakterystycznych stałych) w zależności od wysokości napełniania zbiornika. $C_{p\ gr}$ oznacza najmniejszą wartość współczynnika C_p , przy której poziom cieczy ustali się na danej wysokości, mimo nieprzerwanej pracy pompy. W takim przypadku wydajność pompy zrówna się z natężeniem przepływu w przewodzie odpływowym.

$C_{p\ gr}$ można wyznaczyć z wzoru:

$$C_{p\ gr} = (A + C) \cdot \frac{H - H_{gp} - \frac{P_{at}}{j} + \frac{P_o}{j} \cdot \frac{V_o}{V_o - F H}}{H_o - H_{gl} - H + \frac{P_{at}}{j} - \frac{P_o}{j} \cdot \frac{V_o}{V_o - F H}} \quad (17)$$

otrzymanego przez porównanie prawych stron zależności (7) i (8). Jak wynika z zależności (17) $C_{p\ gr}$ rośnie w miarę podnoszenia się poziomu cieczy w zbiorniku. W konkretnych urządzeniach hydroforowych najczęściej mamy do czynienia z przypadkiem, gdy pompa pracuje przy stałe w pełni otwartej zasuwie regulacyjnej. Dlatego też w większości przypadków, wobec stałości współczynnika C , na długość cyklu pracy układu ma wpływ wyłącznie wielkość współczynnika C_p .

W przypadku rozpatrywania układu, w którym napełnianie zbiornika odbywa się z równoczesnym (nieprzerwanym lub okresowym) odpływem cieczy, wzrost wartości C_p powoduje skrócenie czasu napełniania, a wydłużenie czasu opróżniania. Celowe jest określenie zależności czasu cyklu pracy układu od C_p , aby wyznaczyć jego minimum.

Przedstawiona metoda analizy cyklu pracy układu może znaleźć zastosowanie przy projektowaniu urządzeń hydroforowych.

5. Określenie ilości przetransportowanej cieczy

Efektom pracy analizowanego układu jest transport cieczy na wysokość $H_{gl} + H_{gp}$. Objętość V_c cieczy przetransportowanej na tę wysokość w czasie jednego cyklu, można wyznaczyć z zależności:

$$V_c = \int_0^T Q_p dt \quad (18)$$

przy czym Q_p określone jest zależnością (8).

Po uwzględnieniu związku (13)

$$V_c = \int_0^{t_r} Q_p dt + \int_0^{t_o} Q_p dt \quad (19)$$

Pierwszy człon zależności (19) określa objętość cieczy przetransportowanej w czasie napełniania zbiornika z równoczesnym odpływem cieczy. Drugi człon określa objętość cieczy przetransportowanej w czasie opróżniania zbiornika. Objętość ta jest równa $F \cdot H$ czyli pojemności czynnej zbiornika.

Po wykorzystaniu zależności (10) związek (19) przyjmie postać:

$$V_c = F \int_0^H \frac{Q_p}{Q - Q_p} dH + F H \quad (20)$$

przy czym Q określone jest zależnością (7).

Zależność (20) dotyczy przypadku napełniania zbiornika z jednoczesnym nieprzerwanym odpływem cieczy.

Szczegółowe obliczenie objętości V_0 można przeprowadzić wyłącznie metodą numeryczną. Wykreślne przedstawienie zależności (20) umożliwi również określenie objętości transportowanej cieczy przy napełnianiu zbiornika z okresowym odpływem cieczy, przy wykorzystaniu sposobu omówionego w rozdziale 4. Jednakże przedstawienie zależności (20) musi być każdorazowo przeprowadzane dla zadanych wielkości C i C_p .

Jednak określenie objętości transportowanej cieczy w ciągu pełnego cyklu pracy, nie jest wskaźnikiem jednoznacznie określającym wydajność układu. Wydajność układu można porównywać przez wprowadzenie pojęcia Q_{sr} wydajności średniej układu, określonej jako:

$$Q_{sr} = \frac{V_0}{T} \quad (21)$$

Pojęcie wydajności średniej układu pozwala porównywać układy o różnych okresach cyklu.

6. Średnia sprawność układu

Średnia sprawność pracy układu, w odniesieniu do jednego cyklu może zostać wyznaczona z zależności:

$$\eta_u = \frac{L_u}{E} \quad (22)$$

gdzie:

- L_u - wykonana praca użyteczna,
- E - energia pobrana przez pompę.

L_u może zostać wyznaczona z wzoru:

$$L_u = \int (H_{gl} + H_{gp}) V_0 \quad (23)$$

natomiast E można określić z zależności:

$$E = \int_0^t N dt \quad (24)$$

Po wykorzystaniu związków (2) i (10):

$$E = N_0 t + B F \int_0^H \frac{Q}{Q - Q_p} dH \quad (25)$$

Zależność (25) obowiązuje przy założeniu napełniania zbiornika z równoczesnym nieprzerwanym odpływem cieczy. Całkę występującą w zależności (25) można obliczyć wyłącznie numerycznie. Wykreślne przedstawienie zależności funkcji określonej tą całką, od wysokości położenia poziomu cieczy, umożliwi wyznaczenie zużycia energii w okresie okresowego odpływu cieczy w trakcie napełniania. Przy obliczaniu wielkości energii określanej związkiem (25) możliwe jest znaczne uproszczenie obliczeń. Zależność (25) można przekształcić następująco:

$$E = N_0 t + B F H - B F \int_0^H \frac{Q_p}{Q - Q_p} dH \quad (26)$$

Ale na podstawie związku (20)

$$F \int_0^H \frac{Q_p}{Q - Q_p} dH = V_0 - F H \quad (27)$$

i wtedy

$$E = N_0 \cdot t - B \cdot V_0 + 2 B F H \quad (28)$$

Zależność (28) znacznie upraszcza obliczenie, jeżeli znana jest wielkość V_0 , obliczona z zależności (20).

Zakładając, że napełnianie zbiornika przy okresowym jednoczesnym odpływie cieczy, odbywa się w etapach, jak w rozdziale 2.2, energię E można wyznaczyć z ogólnej zależności:

$$E = N_0 t + B F \int_0^{H_1} dH + B F \int_{H_1}^{H_2} \frac{Q}{Q - Q_p} dH + B F \int_{H_2}^H dH \quad (29)$$

lub po przekształceniach:

$$E = N_0 t + B F (H + H_1 - H_2) + B F \int_{H_1}^{H_2} \frac{Q}{Q - Q_p} dH \quad (30)$$

W analizowanym przypadku energię E określa się jako sumę energii pobranych w poszczególnych okresach pracy.

Oczywiste jest, że średnia sprawność układu powinna osiągnąć jak najwyższą wartość.

7. Przykład liczbowy

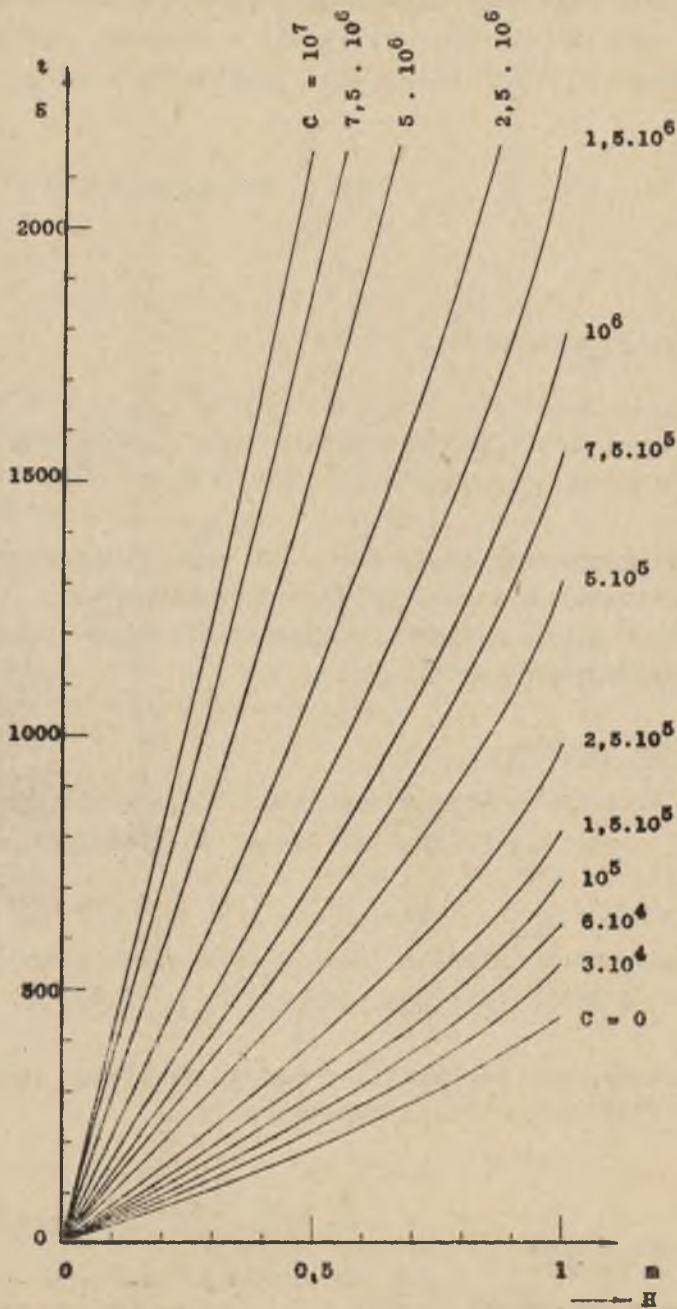
Przeprowadzić analizę pracy modelu urządzenia hydroforowego (zgodnie z rys. 1), którego wielkości charakterystyczne są następujące: $F = 5 \text{ m}^2$, $H = 1 \text{ m}$, $V_0 = 20 \text{ m}^3$, $p_0 = 3,7 \text{ bar}$, $\rho = 9806,65 \text{ N/m}^3$, $p_{at} = 1 \text{ bar}$, $H_{gl} = 2 \text{ m}$, $H_{gp} = 22 \text{ m}$.

Założono, że w układzie zainstalowana jest pompa wirowa której stałe charakterystyczne wynoszą: $H_0 = 45,238 \text{ m}$, $A = 71152 \text{ m}^2/\text{m}^5$.

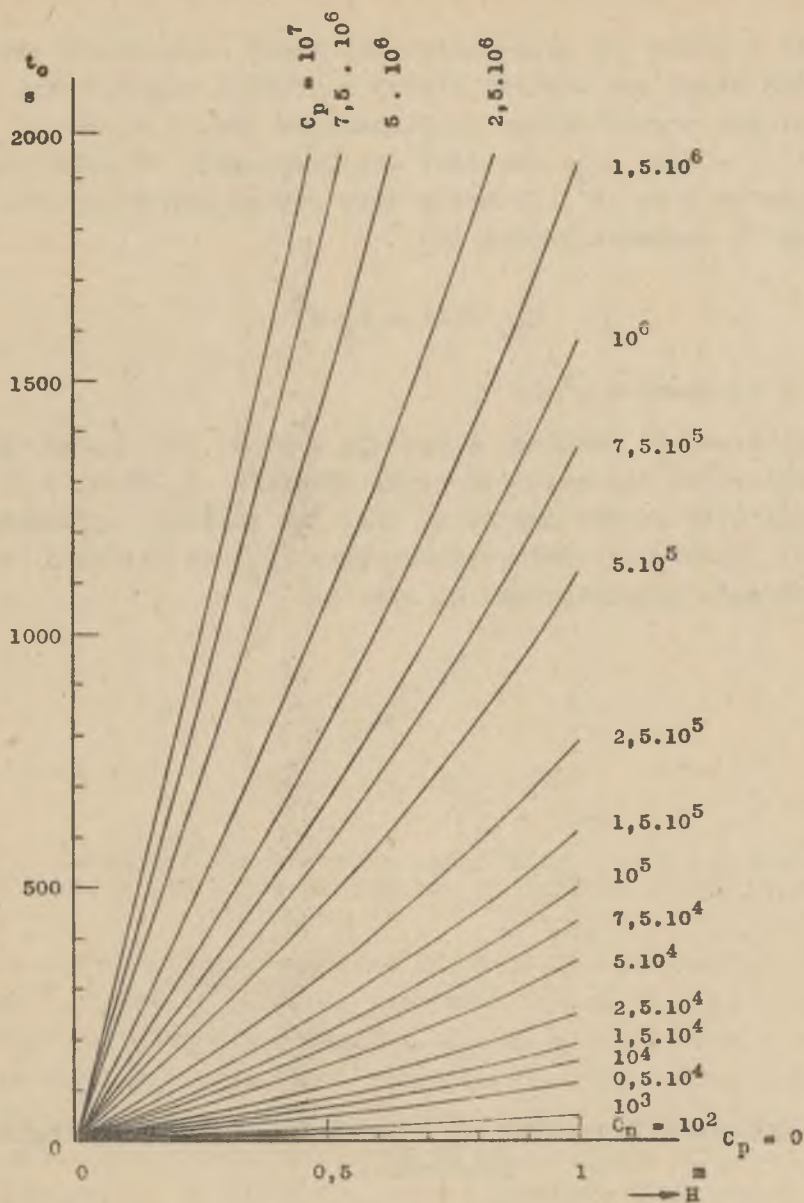
Charakterystykę instalacji pompowej określono równaniem (4); uwzględniając jednocześnie zależność (5):

$$H_r = H + 2 + \frac{3,7 \frac{20}{20 - 5H} - 1}{9806,65} + c Q^2$$

gdzie: Q wyrażone jest w m^3/s .



Rys. 2. Zależność czasu napełniania zbiornika od wysokości poziomu cieczy



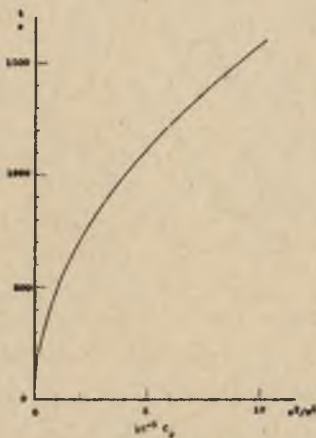
Rys. 3. Zależność czasu opróżniania zbiornika od wysokości poziomu cieczy

W oparciu o pracę [2] przeanalizowano czasy napełniania zbiornika zamkniętego bez odpływu cieczy w trakcie napełnienia. Wyniki obliczeń przedstawiono graficznie na rys. 2 w postaci zależności $t = f(H)$, dla wartości współczynników C zawartych w przedziale od 0 do 10^7 . Zbiornik jest opróżniany przez przewód odpływowy o charakterystyce (6).

$$H_{pr} = 22 + C_p Q^2$$

gdzie: Q wyrażano w m^3/s .

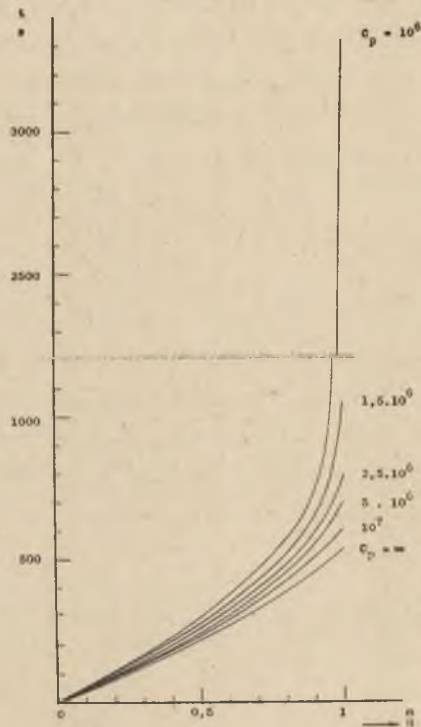
Przeanalizowano również, w oparciu o pracę [2], czasy opróżniania zbiornika dla wartości współczynników C_p od 0 do 10^7 . Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 3 w postaci zależności $t_o = f(H)$. Wpływ wartości współczynnika C_p na wielkość czasu opróżniania przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Wpływ współczynnika C_p na wielkość czasu opróżniania zbiornika

Analizę czasu napełniania zbiornika z jednoczesnym nieprzerwanym odpływem cieczy oraz dalsze rozważania przeprowadzono dla założonej wartości $C = 3 \cdot 10^4$. Stąd równanie charakterystyki przewodu odpływowego:

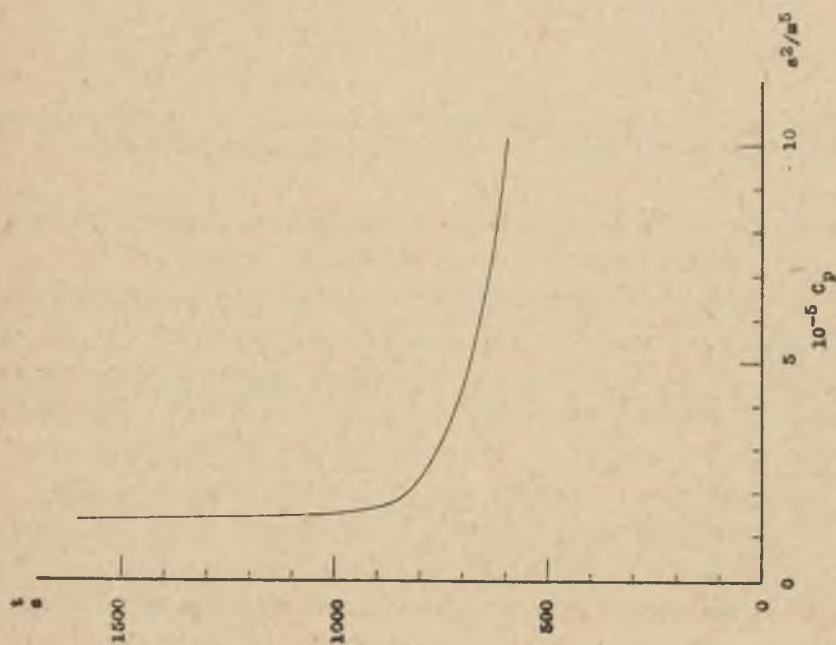
$$H_{pr} = 22 + 3 \cdot 10^4 Q^2$$



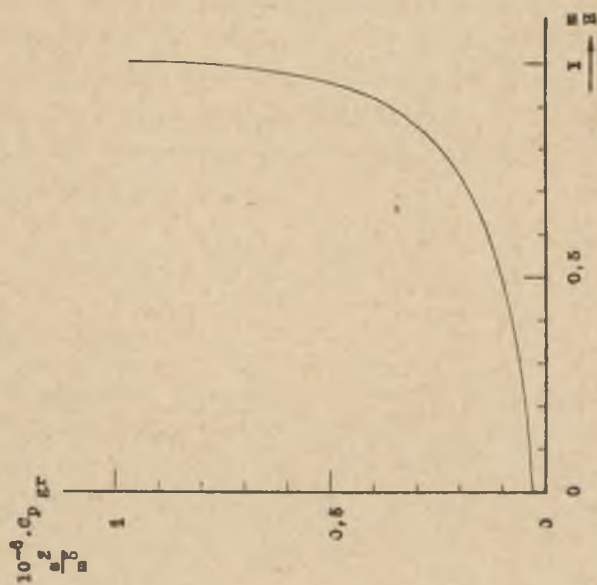
Rys. 5. Zależność czasu napełniania zbiornika z jednoczesnym nieprzerwanym odpływem cieczy, od poziomu napełniania

Wyniki obliczeń przeprowadzono na podstawie zależności (11) dla wartości C_p od 10^6 do ∞ , przedstawiono na rys. 5.

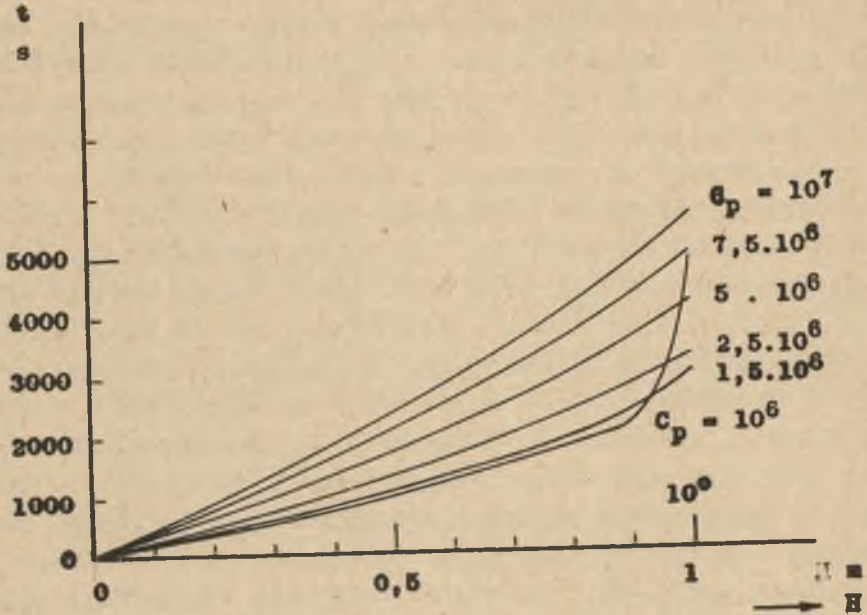
Wpływ wartości współczynnika C_p na wielkość czasu napełnienia ukazano na rys. 6. Z porównania zależności na rys. 6 widać wyraźnie, że jednoczesny odpływ cieczy powoduje wyraźne wydłużenie czasu napełniania w miarę zmniejszania się wartości C_p (krzywa dla wartości $C_p = \infty$ odpowiada napełnianiu zbiornika bez jednoczesnego odpływu cieczy). Równocześnie z rys. 5 wynika, że niewielkie zmniejszenie (w granicach kilku procent) wysokości napełniania zbiornika powoduje bardzo znaczne skrócenie czasu napełniania w zakresie dolnych rozpatrywanych wartości współczynnika C_p . Na rys.7 przedstawiono uzyskaną z wzo-



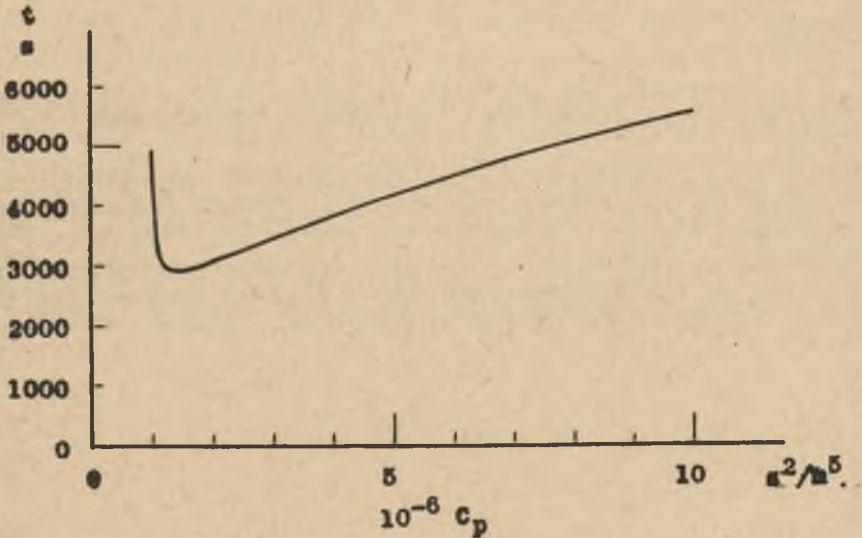
Rys. 6. Wpływ współczynnika C_p na wielkość czasu napełniania zbiornika z jednoczesnym nieprzerwanym odpływem cieczy



Rys. 7. Zależność współczynnika C_p gr od poziomu napełniania zbiornika



Rys. 8. Zależność czasu cyklu pracy urządzenia od poziomu napełnienia zbiornika



Rys. 9. Wpływ współczynnika C_p na czas cyklu pracy urządzenia

ru (17) zależność $C_{p\ gr} = f(H)$. Można na jej podstawie stwierdzić, że niewielkie obniżenie górnego poziomu napełniania zbiornika znacząco obniża wartość $C_{p\ gr}$. Dla zakresu wartości C_p od 10^6 do 10^7 przedstawiono na rys. 8 w oparciu o dotychczasowe wyniki i związek (13), zależność czasu cyklu pracy urządzenia hydroforowego od wysokości napełniania. Wreszcie na rys. 9 przedstawiono zależność cyklu pracy urządzenia (przy napełnianiu zbiornika na wysokość $H = 1$ m) od współczynnika C_p . W rozpatrywanym zakresie C_p , czas cyklu pracy osiąga wartość minimalną dla $C_p \approx 1,04 \cdot 10^6$. Z rys. 8 i 9 wynika ponadto, że w przypadku napełniania zbiornika do wysokości mniejszej niż $H = 1$ m, minimalna długość cyklu pracy zmniejszy się i wystąpi przy niższej wartości współczynnika C_p . Przedstawione zależności graficzne mogą zostać wykorzystane przy analizie pracy układu z jednoczesnym odpływem cieczy w trakcie napełniania zbiornika. Ponadto przedstawione zależności mogą posłużyć do wyznaczenia optymalnych warunków pracy przy napełnianiu zbiornika do innych wysokości.

LITERATURA

- [1] JANKOWSKI F. - Pompownie i urządzenia hydroforowe, Arkady, 1966.
- [2] KORCZAK A., ROKITA J. - Niektóre problemy współpracy pompy wirowej ze zbiornikami zamkniętymi, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej "Energetyka", Zeszyt 30, Gliwice, 1969.
- [3] KORCZAK A., ROKITA J. - Niektóre problemy współpracy pompy wirowej ze zbiornikami otwartymi, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej "Energetyka", Zeszyt 27, Gliwice 1967/68.

АНАЛИЗ РАБОТЫ МОДЕЛИ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ НАПОРНОЙ УСТАНОВКИ

Р е з ю м е

В работе обсуждены насосные системы, работающие совместно с закрытыми резервуарами, в которых во время наполнения наступает истечение жидкости. Такая система является моделью пневматической напорной установки. Проведен анализ влияния характерных величин системы на величину времени цикла работы, расход энергии и коэффициент полезного действия системы. Подан числовой пример.

ANALYSIS OF THE WORK OF A MODEL HYDROPHORE INSTALLATION

S u m m a r y

The paper considers pump systems acting simultaneously with closed containers, from which the liquid flows out while the containers are being filled up. Such a system constitutes a model hydrophore installation. The influence of the characteristic magnitudes of the system on the time of the work cycle, the consumption of energy and the efficiency of the system have been analysed. A numerical example has been given.