

OKREŚLENIE MAKSYMALNEJ WYSOKOŚCI SSANIA POMPY,

ZJAWISKO KAWITACJI.

Kawitacja jest to proces tworzenia się pęcherzyków parowo-gazowych nasyconej cieczy, w skutek miejscowego spadku ciśnienia poniżej wartości krytycznej, bliskiej ciśnieniu parowania tej cieczy przy danej temperaturze. Następnie pęcherzyki porywane przez płynącą ciecz trafiają do obszaru wyższego ciśnienia, gdzie para się skrapla, tam pęcherzyki znikają (implodują) w sposób bardzo gwałtowny, w czasie krótszym niż 0,001 sekundy. Ciecz napływająca z dużą prędkością w miejsce pęcherzyków może osiągnąć ciśnienie rzędu 350 – 500 MPa. Jeżeli miejsce zanikania odbywa się przy ścianie następuje charakterystyczne niszczenie materiału konstrukcyjnego pompy, objawiające się w postaci kawern (wżerów) i porów o głębokości dochodzącej nawet do kilkunastu milimetrów.

Oznakami kawitacji są :

- hałas (nieregularne trzaski i szумы)
- drgania kadłuba
- wyraźne słyszalne odgłosy, jakby uderzenia

Kawitacja towarzyszy spadkowi ciśnienia co jest związane ze wzrostem prędkości cieczy, który obserwujemy głównie w pompach wirowych a szczególnie w pompach o wyższych wartościach wyróżnika szybkobieżności n_{sQ} . W pompach wyporowych kawitacja występuje rzadko, ze względu na małe prędkości cieczy.

WPŁYW KAWITACJI NA PRACĘ POMPY

W pierwszym stadium, gdy tworzą się pęcherzyki parowo –gazowe, kawitacja nie ma większego wpływu na pracę pompy. Według niektórych hipotez nawet zwiększa jej wydajność, zmniejszając tarcie cieczy w warstwie przyściennej.

W drugim stadium, implozje pęcherzyków wywołują drgania całej pompy a jednocześnie manometry na ssaniu i tłoczeniu wykazują nadmierne wahania, towarzyszy temu spadek wysokości podnoszenia i sprawności pompy.

Trzecie stadium, to bardzo silna kawitacja, następuje wtedy załamanie się charakterystyk przepływu, poboru mocy i sprawności.

Powstanie kawitacji związane jest z :

- dużą wysokością ssania,

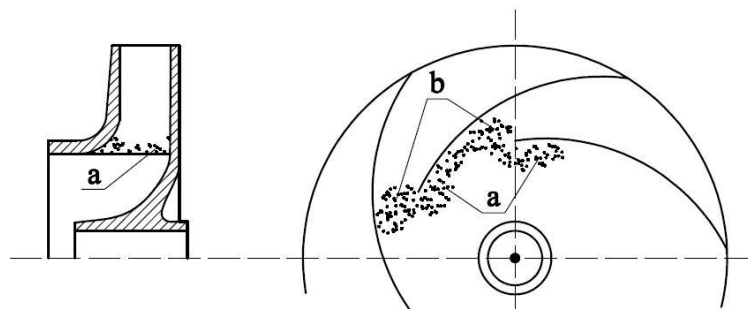
- dużą prędkością obrotową wirnika,
- przekroczeniem nominalnej wydajności, co wiąże się z nadmiernym wzrostem prędkości i spadkiem ciśnienia na ssaniu,
- nieprawidłowym zasilaniem wirnika wynikającym ze złego kształtu kanału wlotowego.

SPOSOBY ZAPOBIEGANIA KAWITACJI

- ustawienie pompy z zapewnieniem możliwie małej wysokości ssania lub dużego napływu,
- eksploataowanie w pobliżu nominalnej wydajności,
- zabezpieczenie przed wzrostem temperatury pompowanej cieczy – w sytuacji pracy w obiegu zamkniętym,
- zabezpieczenie przed nieprzewidzianym wzrostem prędkości obrotowej pompy
- zapewnienie jak najmniejszych oporów w przewodzie ssawnym – powodem może być zanieczyszczenie smoka lub kosza ssawnego.

OKREŚLENIE MAKSYMALNEJ WYSOKOŚCI SSANIA.

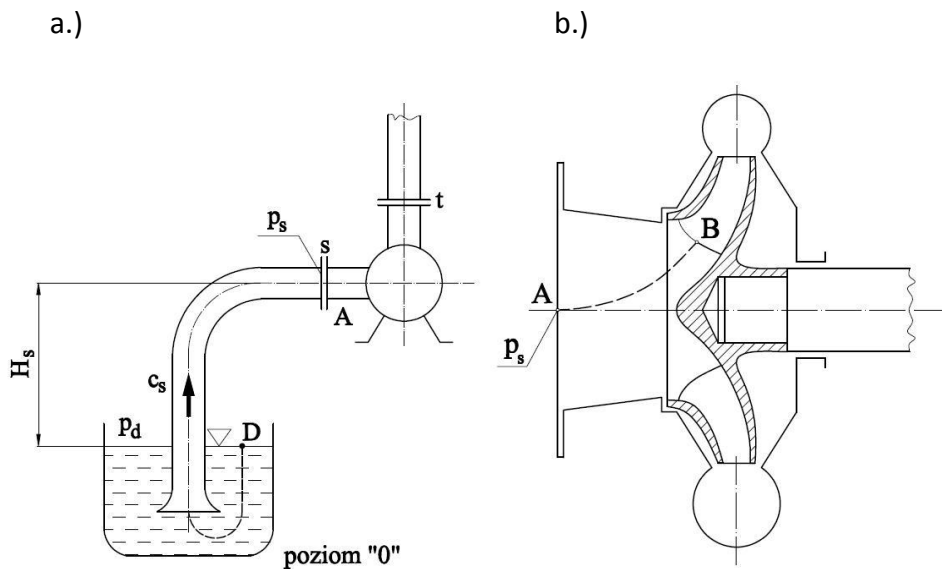
Łopatki wirnika i kierownicy oraz powierzchnie wewnętrzne ścian pompy mogą być poddane działaniu korozji, erozji oraz kawitacji. Miejsca atakowane przez kawitację są nieco przesunięte w kierunku przepływu w stosunku do miejsca, w którym następuje implozja pęcherzyków parowo gazowych. Obszar o ciśnieniu, niższym niż ciśnienie parowania (p_v) przy danej temperaturze, znajdują się najczęściej na tylnej ścianie łopatki (a) w pobliżu krawędzi wlotowej (b) do wirnika rys.1 . W miejscu tym następuje nagły wzrost prędkości, sprzyjający powstawaniu kawitacji.



Rys.1 Miejsca występowania kawitacji w pompie.

Aby nie wystąpiła kawitacja **ciśnienie w każdym przekroju przepływowym pompy powinno być wyższe od ciśnienia parowania p_v w danej temperaturze.**

Ponieważ najłatwiej jest mierzyć ciśnienie na wlocie do króćca ssawnego pompy, dlatego wymagane nadwyżki ciśnienia odnosi się do tego właśnie przekroju.



Rys. 2

Dla cieczy znajdującej się w rurociągu ssawnym (rys. 2a) można napisać równanie Bernoulliego

$$\frac{c_d^2}{2g} + \frac{p_d}{\rho g} = \frac{c_s^2}{2g} + \frac{p_s}{\rho g} + H_s + \Delta h_s \quad (1)$$

gdzie: c_d - prędkość w zbiorniku dolnym (przyjmuje się równe 0)

p_d - ciśnienie w zbiorniku dolnym (zazwyczaj równe p_b)

c_s - prędkość w króćcu ssawnym

p_s - ciśnienie w króćcu ssawnym (przed pompą)

H_s - wysokość ssania

Δh - wysokość strat na odcinku ssawnym

ρ - gęstość cieczy przepływającej

g - przyspieszenie ziemskie

Zakładając, że ciśnienie przed pompą p_s (przekrój A – A) nie powinno spaść do ciśnienia wrzenia p_v w danej temperaturze, łatwo wyznaczyć z powyższego równania wysokość ssania:

$$H_s = \frac{p_b}{\rho g} - \frac{p_v}{\rho g} - \frac{c_s^2}{2g} - \Delta h_{str}$$

gdzie: p_v – ciśnienie wrzenia cieczy w danej temperaturze

Jest to jednak założenie uproszczone, gdyż jak już wspomniano, zjawisko kawitacji ma miejsce głównie na wejściu do wirnika i tam istnieje największe zagrożenie spadku ciśnienia. W związku z tym do tego miejsca należy odnieść tok rozumowania.

Dla punktu A leżącego w przekroju wlotowym króćca ssawnego, i punktu B, znajdującego się w miejscu o najniższym ciśnieniu można napisać równanie, w którym $p_A = p_s$ a $c_A = c_s$ oraz po pominięciu różnic wysokości położenia obu punktów w celu uproszczenia, otrzymamy

$$\frac{p_s}{\rho g} + \frac{c_s^2}{2g} = \frac{p_B}{\rho g} + \frac{c_B^2}{2g} + \Delta h_{AB}$$

Początek kawitacji następuje kiedy $p_A = p_{s\ kr}$ wtedy $p_B = p_{min} = p_v$

$p_{s\ kr}$ – krytyczne ciśnienie na ssaniu

$$\frac{p_{s\ kr}}{\rho g} + \frac{c_s^2}{2g} = \frac{p_v}{\rho g} + \frac{c_B^2}{2g} + \Delta h_{AB}$$

Jak się okazuje, kawitacja występuje jednak przy ciśnieniu niższym niż p_v a **wielkości c_B i Δh_{AB} decydująca o tym, kiedy to zjawisko zostanie zapoczątkowane, im wartość ich jest większa tym zagrożenie kawitacją jest oczywiście większe.**

Trudno dokładnie określić ile wynosi c_B i Δh_{AB} , dlatego wygodniej jest traktować te wielkości łącznie jako funkcję parametrów zmierzonych w przekroju wlotowym króćca ssawnego. Sumę tą nazwano „nadwyżką netto wysokości ssania” (skrót z ang. NPSH - Net Positive Section Head) i jest ona wyznaczana doświadczalnie w przekroju wlotowym króćca ssawnego.

$$\frac{c_B^2}{2g} + \Delta h_{AB} = NPSH_{kr} \quad (2)$$

$NPSH_{kr}$ – krytyczne, ponieważ mamy do czynienia z początkiem kawitacji

$$NPSH_{kr} = \frac{p_s}{\rho g} - \frac{p_v}{\rho g} + \frac{c_s^2}{2g} \quad (3)$$

Jeżeli pompa ma pracować poza obszarem kawitacji wartość nadwyżki $NPSH_{kr}$ powinna być większa i wtedy mówimy o tzw. nadwyżce wymaganej, oznaczanej $NPSH_r$

$$NPSH_r = k NPSH_{kr}$$

gdzie : k w zależności od typu pompy wynosi 1.1 - 1.3

Wstawiając do równania (1) wyrażenia (3) możemy wyliczyć maksymalną wysokość ssania

$$\frac{p_d}{\rho g} = \frac{c_s^2}{2g} + \frac{p_s}{\rho g} + H_s + \Delta h_s$$

przyjęto $p_d = p_b$

$$NPSH_{KR} + \frac{p_v}{\rho g} = \frac{c_s^2}{2g} + \frac{p_s}{\rho g}$$

$$\frac{p_b}{\rho g} = NPSH_r + \frac{p_v}{\rho g} + H_s + \Delta h_s$$

$$H_s = \frac{p_b}{\rho g} - NPSH_r - \frac{p_v}{\rho g} - \Delta h_s \quad (4)$$

lub

$$H_s = \frac{p_b}{\rho g} - \frac{p_v}{\rho g} - \sigma H(h_{cav}) - \Delta h_s$$

gdzie:

σH lub h_{cav} (tzw. depresja dynamiczna) to inne oznaczenia $NPSH_r$, a σ to wyróżnik kawitacji, który przyjmuje różne wartości w zależności od rodzaju pompy.

I tak G. Wislicenus, R. Watson i T. Karsassik na podstawie badań podali, że:

- dla pomp odśrodkowych z wirnikiem jednostrumieniowych

$$\sigma = 12.2 \cdot 10^{-4} n_{SQ}^{4/3}$$

- dla pomp odśrodkowych z wirnikiem dwustrumieniowym

$$\sigma = 7.7 \cdot 10^{-4} n_{SQ}^{4/3}$$

Wg. Andersona zaś, σ dla pompy jednostopniowej lub wysokości jednego stopnia wynosi

$$\sigma = \frac{8.8 \cdot 10^{-4}}{\eta_h^2} \cdot n_{SQ}^{-3/4}$$

uwzględniając zależność że,

$$n_{sQ} = \frac{n\sqrt{Q}}{H^{3/4}} \text{ - jt. wyróżnik szybkobieżności pompy}$$

to po przekształceniu otrzymamy

$$\sigma = \frac{8.8}{\eta_h^2} 10^{-4} \cdot \frac{(n^2 Q)^{2/3}}{H}$$

Wstawiając tę wartość do równania (4) otrzymamy wzór określający wysokość ssania na granicy obszaru kawitacyjnego dla pomp odśrodkowych z wirnikiem jednostrumieniowym.

$$H_{smax} = \frac{p_b}{\rho g} - \frac{p_v}{\rho g} - \frac{8.8}{\eta_h^2} \cdot 10^{-4} \cdot (n^2 Q)^{2/3} - \Delta h_s \quad (5)$$

Przekształcając to równanie, otrzymamy zależność :

$$n^2 \dot{Q} \leq 3.8 \cdot 10^{-4} \cdot \eta_h^3 \cdot (h_b - h_v - \Delta h_s - H_{smax})^{3/2}$$

Z równania tego wynika, że każdej wartości wysokości ssania odpowiada wartość iloczynu $n^2 \dot{Q}$ po przekroczeniu której pompa wchodzi w obszar kawitacji. Im większa wartość iloczynu $n^2 \dot{Q}$ tym mniejsza może być wysokość ssania.

Przykład.

Obliczyć maksymalną wysokość ssania pompy odśrodkowej przy następujących warunkach pracy: $\dot{Q} = 0.25 \text{ m}^3/\text{s}$, $n = 1450 \text{ obr}/\text{min}$, $\eta_h = 0.8$, $p_b = 980 \text{ hPa}$, $p_v = 2000 \text{ Pa}$, dł. przewodu ssącego $l = 10 \text{ m}$, zawiera on kosz ssawny o $\xi_{ks} = 8$ oraz jeden łuk rurowy o kącie wygięcia 90° dla którego $\xi_{90} = 0.3$, średnica przewodu wynosi $d = 0.45 \text{ m}$.

$$\dot{Q} = c_s \Pi \frac{d^2}{4} \quad \text{stad} \quad c_s = 1.6 \text{ m/s}$$

$$\Delta h_{st} = \frac{c_s^2}{2g} \left(\xi_{ks} + \xi_{90} + \lambda \frac{l}{d} \right)$$

$$H_{smax} = \dots\dots\dots$$

$$H_{smax} = \dots\dots\dots \text{ m}$$

Opracował : **Wojciech Knapczyk**

Literatura : Instrukcja - Badanie pompy. Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych A G H.

W. Jędral - Pompy wirowe.

Sz. Łazarkiewicz - Pompy wirowe.

A.T. Troskoleński - Pompy wirowe