

ssania H_s oraz ciśnienie p_a w zbiorniku dolnym nie ulegają zmianie. Na odcinku AB wewnątrz pompy (rys. 10.1b) ciśnienie zmniejszy się jeszcze o pewną wartość Δp_{na} . Ciśnienie w punkcie B , najniższe w układzie, będzie się dalej zmniejszało ze wzrostem n . Jego spadek do wartości nieco niższej od wartości ciśnienia parowania (inaczej nasycenia lub saturacji) p_v w danej temperaturze powoduje pojawienie się i gwałtowny wzrost pęcherzyków parowo-gazowych, które następnie zanikają w obszarze podwyższonego ciśnienia. W pompie występuje wówczas kavitacja.

Do wystąpienia kavitacji w pompie można doprowadzić też innymi sposobami, bez zmiany prędkości obrotowej, np. przez obniżenie poziomu cieczy w zbiorniku dolnym (powiększenie H_s), obniżenie ciśnienia p_a , przyspieszenie zaworu w rurociągu ssawnym i tym samym nadmierne powiększenie oporów Δh , lub (jeśli warunki pracy pompy w układzie to umożliwiają) — nadmierne powiększenie jej wydajności w wyniku całkowitego otwarcia zaworu regulacyjnego w rurociągu tłocznym.

10.2. Istota, objawy i skutki kavitacji

Kavitacją nazywa się zespół zjawisk towarzyszących przepływowi cieczy, polegających na powstawaniu, a następnie zanikaniu wypełnionych parą i gazem obszarów nieciągłości przepływu w postaci pęcherzyków i pęcherzy. Pęcherzyki powstają w miejscach, gdzie ciśnienie płynącej cieczy spada miejscowo do wartości nieco niższej od jej ciśnienia parowania p_v w danej temperaturze, zanikają zaś w innych miejscach, w których ciśnienie płynącej cieczy rośnie do wartości dostatecznie przewyższającej p_v .

Ze względu na wystąpienie przemiany fazowej ciecz — para kavitacja może być uważana za zjawisko analogiczne do wrzenia. Różnica polega na tym, że wrzenie powodowane jest przez czynniki natury termodynamicznej i może zachodzić w cieczy pozostającej w spoczynku. Do powstania kavitacji potrzebny jest natomiast ruch cieczy i związany z nim dynamiczny spadek ciśnienia do wartości nieco niższej od p_v oraz obecność w strefie obniżonego ciśnienia zarodników kavitacji.

Zarodniki kavitacji są to przede wszystkim mikropęcherzyki parowo-gazowe, o średnicach nie przekraczających 100 μm , znajdujące się w cieczy w sposób naturalny. Spadek ciśnienia do wartości $p < p_v$ (ze względu na napięcie powierzchniowe) powoduje utratę stabilności i gwałtowny wzrost objętości mikropęcherzyka, a więc początek kavitacji [26]. Kavitacja pojawia się przede wszystkim w miejscach lokalnego wzrostu prędkości przepływu cieczy lub silnego jej zawrócenia. Powstawaniu kavitacji sprzyjają duże prędkości i niskie ciśnienia w całym układzie przepływowym, ponadto także gwałtowne zmiany wartości i kierunku prędkości, przepływy z oderwaniem warstwy przysięennej i inne zakłócenia przepływów.

Kavitację spotyka się najczęściej w maszynach hydraulicznych, np. w pompach lub turbinach wodnych, oraz w pędnikach (śrubach) okrętowych. Występuje ona jednak również w rurociągach, zazwyczaj w takich miejscach jak zawory, zasuwki lub też przewężeniach, np. w zwężce Venturiego. Kavitacji nie należy mylić ze zjawiskiem oderwania strug od odpływającej powierzchni.

Okres tworzenia się pęcherzyka kawatycyjnego i czas jego trwania wynoszą tysiączne części sekundy, czas zasklepienia jest jeszcze o rząd wielkości mniejszy. Kondensacja pary związana z gwałtownym zanikaniem pęcherzyka ma charakter implodji, której towarzyszy lokalny przyrost ciśnienia rzędu kilkuset megapaskali. Częstość implodji sięga 25 kHz, a zasklepianie się pęcherzyków następuje zarówno wewnątrz strumienia cieczy, jak też w najbliższym sąsiedztwie omiayanych powierzchni, zwłaszcza we wgłębieniach lub pęknięciach tych powierzchni.

Natężenie kavitacji w danej cieczy określa się liczbą pęcherzyków przypadających na jednostkę powierzchni, ich rozmiarami oraz częstością implodji.

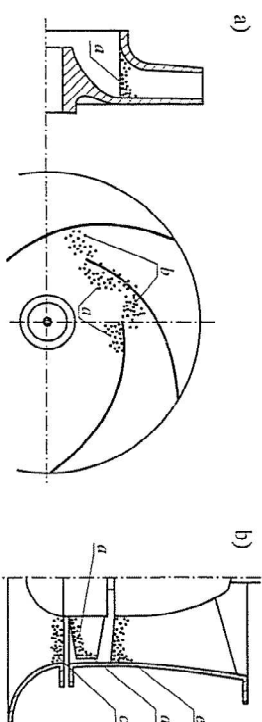
O kavitacji występującej w pompie mogą świadczyć:

- zwiększony hałas i drgania spowodowane znacznymi pulsacjami ciśnień,
- widoczne obniżenie się parametrów pracy, zwłaszcza wysokości podnoszenia H , a nawet zerwanie słupa cieczy i spadek wydajności do zera,
- znalezienie się punktu pracy na charakterystyce kawatycyjnej w obszarze I, II lub III fazy kavitacji,
- zniszczenia spowodowane erozją kawatycyjną, będące najbardziej oczywistym dowodem występowania kawatycji w dostatecznie długim okresie czasu.

Przy niewielkim natężeniu kawatycji objawy podane w punktach a), b), c) mogą być niewidoczne i wystąpienie kawatycji można stwierdzić dopiero po znalezieniu śladów erozji kawatycyjnej na elementach pompy.

Implodje pęcherzyków na powierzchniach elementów przepływowych maszyn hydraulicznych powodują wyrzucanie cząstek materiału tych powierzchni, wskutek czego tworzą się na nich wżery kawatycyjne, nierzadko bardzo głębokie. Jest to właśnie *erozja kawatycyjna*, zjawisko różne od „zwykłej” erozji wywołanej dynamicznym działaniem na ścianki cząstek ciał stałych transportowanych w cieczy. Na rozmiary erozji kawatycyjnej ma wpływ natężenie kawatycji, również rodzaj materiału, stan powierzchni oraz rodzaj obróbki powierzchniowej elementów omiayanych.

Miejscami najbardziej atakowanymi przez erozję kawatycyjną w typowych pompach są łopatki i tarcze wirników w pobliżu krawędzi wlotowych łopatek (rys. 10.2 i 10.3). Miejsca te, oznaczone jako a , b na rys. 10.2, przesunięte są w kierunku przepływu względem miejsc, gdzie tworzą się pęcherzyki. Przy dużej intensywności kawatycji i dużej



Rys. 10.2. Uszkodzenia wskutek kawatycji: a) w wirniku pompy odśrodkowej, b) w wirniku pompy śmigłowej



Rys. 10.3. Wzory kawitacyjne w płacie i na łopatkach wirnika pompy diagonalnej, wg [9]

prędkości cieczy ślady zniszczenia spotyka się również w pobliżu krawędzi wylotowych łopatek, a nawet niekiedy na łopatkach kierownic odśrodkowych i na ściankach spiralnych kanałów zbiorczych. W pompach śmigłowych i diagonalnych o otwartych wirnikach uszkodzenia kawitacyjne występują na łopatkach wirnika b , d a także na ścianie leja ssawnego c oraz na łopatkach kierownicy i ścianach osłony e — w wyniku tzw. *kawitacji szczelinowej*.

Materiały odporne na erozję kawitacyjną powinna charakteryzować duża wytrzymałość połączona z wysoką odpornością na korozję. Poszczególne materiały można uszeregować według wartości wskaźnika ubytku masy spowodowanego erozją kawitacyjną w określonym czasie. Jeśli dla żeliwa szarego 250 przyjąć ten wskaźnik jako równy 1, to wg [2] dla innych materiałów często stosowanych na odlewy wirników wskaźnik ten wynosi w przybliżeniu:

- brąz B10 (CuSn10) — 0,5,
- staliwo chromowe LH14 — 0,2,
- brąz aluminiowy BA1032 — 0,1,
- staliwo kwasoodporne LH18N9T — 0,05,
- staliwo wysokochromowe NORIDUR — 0,02, (25% Cr; 6% Ni; 2,4% Mo; 3,1% Cu).

Wzrostowi odporności na erozję kawitacyjną sprzyja utwardzenie powierzchni przez walcowanie, kucie, srurowanie itp. lub odpowiednią obróbkę powierzchniową, np. azotowanie, nawęglanie, hartowanie.

Dobłą odporność na erozję kawitacyjną wykazują twarde materiały niemetalowe, jak szkło lub porcelana, oraz niektóre tworzywa, jak np. nylon.

10.3. Przyczyny powstawania kawitacji i jej rodzaje

Bezpośrednią przyczyną powstania kawitacji jest lokalne zmniejszenie się ciśnienia cieczy do wartości nieco mniejszej od ciśnienia parowania w danej temperaturze. Nadmiernie duży spadek ciśnienia mogą spowodować następujące czynniki:

- a) powiększenie prędkości przepływu u wlotu na łopatkę wirnika (punkt B na rys.

10.1b) ponad wartość maksymalną, odpowiadającą maksymalnej wydajności $Q_{\max}$ danej pompy,

- b) niewłaściwe zainstalowanie pompy i błędy w wykonaniu rurociągu ssawnego,
- c) zmiana w czasie eksploatacji pompy jej warunków pracy lub właściwości rurociągu, prowadząca do powstania kawitacji nieobserwowanej w początkowym okresie eksploatacji.

Ze względu na miejsce występowania i charakterystyczne objawy rozróżnia się trzy podstawowe rodzaje kawitacji:

- a) *kawitację powierzchniową* — zjawisko powstawania kawitacji w pobliżu łopatki wirnika lub na jej powierzchni biernej,
- b) *kawitację przestrzenną* (obłok kawitacyjny) — zjawisko powstawania kawitacji przed wirnikiem lub w obszarze międzyłopatkowym wirnika,
- c) *kawitację szczelinową* — zjawisko powstawania kawitacji w pobliżu lub wewnątrz szczeliny oddzielającej element wirujący od nieruchomej ściany kadłuba pompy.

10.4. Początek, stopnie rozwoju i fazy kawitacji

Do wystąpienia kawitacji można doprowadzić w sposób zamierzony przez:

- obniżenie poziomu cieczy w otwartym zbiorniku (obszarze) dolnym,
- zmniejszenie ciśnienia w zamkniętym zbiorniku dolnym,
- dławienie przepływu w rurociągu ssawnym.

Mierząc wówczas podstawowe parametry pompy, można następnie zbudować krzywe rozwoju kawitacji (rys. 10.4) lub charakterystyki przepływu przy występowaniu kawitacji (rys. 10.5).

Na wszystkich wspomnianych krzywych wyróżnia się odcinki odpowiadające różnym stopniom rozwoju i fazom kawitacji.

Stopień rozwoju kawitacji jest to jednoznacznie określony stan rozwoju zjawiska kawitacji, odpowiadający danemu punktowi na krzywej rozwoju kawitacji lub charakterystyce przepływu.

Faza kawitacji jest to zbiór wielu różnych, lecz zbliżonych do siebie charakterem stopni rozwoju kawitacji, odpowiadający określonym odcinkowi krzywej rozwoju kawitacji lub charakterystyki przepływu (rys. 10.4 i 10.5).

Ustalenie rzeczywistego początku kawitacji jest dość niepewne, bowiem trudno jest precyzyjnie określić, dla jakiej wartości zmiennej niezależnej analizowane charakterystyki zaczynają się odchylać od linii prostej (rys. 10.4) lub krzywej właściwej dla pracy bez kawitacji (rys. 10.5). Przyjmuje się więc zwykle umownie, że początek kawitacji jest granicą I i II fazy kawitacji. Ma on miejsce wówczas, gdy wartość H lub Y na krzywej rozwoju kawitacji lub charakterystyce przepływu w stadium kawitacji zmniejszy się o mH lub mY , w porównaniu do odpowiedniej wartości, przy której nie stwierdza się jeszcze kawitacji (tzn. nie występują odchylenia od typowego kształtu odpowiednich krzywych na rys. 10.4 lub rys. 10.5). Tak ustalony początek kawitacji wyznacza umowny punkt krytyczny na odpowiedniej charakterystyce kawitacyjnej.

z depresją dynamiczną u wlotu na łopatkę). Wygodnie jest więc potraktować łącznie sumę obu ostatnich wyrazów o powyższym wzorze, zakładając, że może ona być wyznaczona doświadczalnie jako funkcja wielkości zmierzonych w przekroju wlotowym króćca ssawnego. Tę właśnie sumę nazywano *krytyczną nadwyżką antykawitacyjną energii* $NPSE_{kr}$, przy czym $NPSE$ stanowi skrót powszechnie przyjętej w świecie anglosaskiej nazwy *Net Positive Suction Energy*.

Przekształcając ostatnią zależność, otrzymuje się wzór, który można uznać za definicję nadwyżki $NPSE_{kr}$

$$NPSE_{kr} = \frac{p_{skr} - p_v}{\rho} + \frac{c_s^2}{2}, \quad (10.2a)$$

która jest taką nadwyżką energii w króćcu ssawnym, ponad energię odpowiadającą ciśnieniu p_v , mimo istnienia której rozpoczyna się kavitacja w najbardziej zagrożonym miejscu pompy.

Z tych samych powodów, dla których znacznie częściej stosuje się wysokości H niż energie właściwe Y , w praktyce używane są nadwyżki antykawitacyjne

$$NPSH = \frac{NPSE}{g},$$

gdzie $NPSH$ oznacza skrót nazwy *Net Positive Suction Head* (co można przetłumaczyć jako „nadwyżka netto wysokości ssania”). Ze wzoru (10.2a) otrzymuje się wówczas

$$NPSH_{kr} = \frac{p_{skr} - p_v}{\rho g} + \frac{c_s^2}{2g}. \quad (10.2b)$$

Uogólnienie zależności (10.2) umożliwia wprowadzenie pojęcia nadwyżki antykawitacyjnej energii oraz nadwyżki antykawitacyjnej dla dowolnych warunków pracy pompy, a więc również i takich, w których kavitacji nie ma

$$NPSE = \frac{p_s - p_v}{\rho} + \frac{c_s^2}{2}, \quad (10.3a)$$

$$NPSH = \frac{p_s - p_v}{\rho g} + \frac{c_s^2}{2g}. \quad (10.3b)$$

Praca pompy poza obszarem kavitacji wymaga większej nadwyżki

$$NPSH_r = k NPSH_{kr}, \quad (10.4)$$

gdzie $k > 1$ zależy od typu pompy i warunków pracy; zwykle $k = 1,1 + 1,3$; indeks r pochodzi od słowa *required* (wymagany). Rzeczywista, istniejąca wartość nadwyżki antykawitacyjnej zależy od ciśnienia cieczy w zbiorniku dolnym i od geometrii rurociągu ssawnego; na podstawie (10.1), uwzględniając możliwość dopływu cieczy z prędkością c_{dopl} obszaru dolnego (rozdz. 2), można napisać

$$\frac{p_d}{\rho g} + \frac{c_{dopl}^2}{2g} = \frac{p_s}{\rho g} + \frac{c_s^2}{2g} + H_{zs} + \Delta h_s,$$

Oznaczając przez $NPSH_{av}$ nadwyżkę rozporządzalną dla pompy (*available*) i podstawiając do ostatniego wzoru wynikającą z (10.3b) zależność

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

otrzymuje się

$$NPSH_{av} = \frac{p_d - p_v}{\rho g} + \frac{c_{dopl}^2}{2g} - H_{zs} - \Delta h_s. \quad (10.5)$$

W większości przypadków wyraz z c_{dopl}^2 można pominąć. W pompie nie wystąpi kavitacja, jeśli będzie spełniony warunek³⁾

$$NPSH_{av} \geq NPSH_r.$$

Wartości $NPSH'_{kr}$, $NPSH'_r$ i $NPSH'_{av}$ dla pompy bez króćca ssawnego (z lejem, wlotowym) oblicza się z nieco innych zależności, podanych w punkcie 11.3.5.

Ze wzoru (10.5) można otrzymać warunek na największą dopuszczalną geometryczną wysokość ssania (dla której $NPSH_{av} = NPSH_r$)

$$H_{z3 \max} = \frac{p_d - p_v}{\rho g} - NPSH_r - \Delta h_s. \quad (10.6)$$

Uzyskanie ujemnej wartości $H_{z3 \max}$ będzie świadczyło o konieczności zapewnienia minimalnej geometrycznej wysokości napływu, o wartości $H_{z3 \min} = -H_{z3 \max}$.

Analogicznie do wzoru na wyróżnik szybkobieżności pompy definiuje się kavitacyjny wyróżnik szybkobieżności S_y

$$S_y = \frac{\omega Q_{opt}^{1/2}}{NPSH_{kr}^{3/4}}. \quad (10.7a)$$

W przypadku $a = g$ stosuje się powszechnie wyróżnik o postaci

$$S = \frac{\eta Q_{opt}^{1/2}}{NPSH_{kr}^{3/4}} = \approx 53 S_y. \quad (10.7b)$$

Do wzorów (10.7) w miejsce Q należy podstawić wartość całej wydajności pompy z wirnikiem jednostrumieniowym lub połowy wydajności pompy z wirnikiem dwustrumieniowym.

Wyznaczona doświadczalnie wartość wyróżnika S jednoznacznie charakteryzuje własności antykawitacyjne pompy. Przeciętnie wykonane typowe pompy ośrodkowe mają wyróżnik rzędu $S = 120 + 160$. Starannie zaprojektowane i wykonane pompy, z łopatkami wirnika o krzywiznie przestrzennej, mają $S = 160 + 200$. Pompy z wirnikami projektowanymi specjalnie pod kątem dobrych własności antykawitacyjnych osiągają

³⁾ W aktualnych normach PN-EN-ISO przyjęto nieco mniej czytelną oznaczenia $NPSH_r$ i $NPSH_{av}$ oraz, dla $m = 0,03$, krytyczną wartość nadwyżki $NPSH_{cr} = NPSH_{kr}$.

$S = 200 \pm 300$. Największe wartości S , rzędu nawet 2000, uzyskują pompy zaopatrzone w specjalny wstępny wirnik śrubowy umieszczony tuż przed wirnikiem właściwym.

Oprócz kawatcyjnych wyróżników szybkoobrotowości stosowane są również tzw. wyróżniki kawatcyjne σ , określone wzorem ogólnym

$$\sigma = \frac{NPSE}{Y} = \frac{NPSH}{H} \quad (10.8)$$

W przypadku pompy wielostopniowych wielkości Y i H odnoszą się do pierwszego stopnia pompy.

Wskazując podane uprzednio orientacyjne wartości S , można oszacować $NPSH_{kr}$, a stąd $NPSH$, w punkcie nominalnym $Q = Q_n$ pracy pompy, której charakterystyki kawatcyjne nie są znane.

10.6. Charakterystyki kawatcyjne

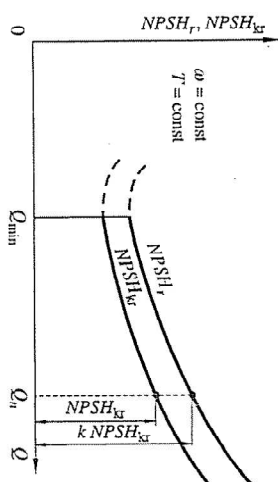
Własności antykawatcyjne pompy można najpełniej ocenić na podstawie charakterystyk, przedstawiających przebieg zmienności parametrów pracy pompy w różnych fazach kawatcji. Wyodrębnia się trzy podstawowe grupy tych charakterystyk:

- krzywe rozwoju kawatcji,
- charakterystyki przepływu przy obecności kawatcji,
- charakterystyki własności antykawatcyjnych pompy.

Krzywą rozwoju kawatcji jest nazywany wykres przedstawiający zależność jednego z parametrów pracy pompy, tj. Q , H , Y , P , η lub $M = P/\omega$, od jednej z wielkości bezpośrednio związanych ze stopniem rozwoju kawatcji (rys. 10.4). Zmiennymi niezależnymi (odcięcymi na wykresach) mogą więc być: P_s , $NPSH_{av}$, $NPSE_{av}$, σ_{av} , H_{zr} , H_{zr} . Możliwe są dowolne kombinacje wszystkich zmienionych zależnych ze wszystkimi zmiennymi niezależnymi. Zależności powyższe dotyczą cieczy o określonych własnościach fizycznych. Krzywą rozwoju kawatcji otrzymuje się doświadczalnie przy $\omega = \text{const}$ i $H = \text{const}$, jeśli zmienną zależną jest Q lub $\omega = \text{const}$ i $Q = \text{const}$ w pozostałych przypadkach. Krzywa rozwoju kawatcji wyznacza jeden punkt na charakterystyce własności antykawatcyjnych pompy.

Charakterystyką przepływu pompy przy występowaniu kawatcji jest nazywana część krzywej dławienia $H = f(Q)$ lub $Y = f_1(Q)$, obejmująca przynajmniej I i II fazę kawatcji (lub część II fazy), otrzymana dla cieczy o określonych własnościach fizycznych, przy stałej prędkości kątowej ω wirnika. Każda z podstawowych odmian charakterystyk tej grupy (rys. 10.5) wyznacza jeden punkt na charakterystyce własności antykawatcyjnych. Charakterystyki te również mogą być stosowane do budowania charakterystyk zbiorczych, omówionych w dalszym tekście.

Charakterystyką własności antykawatcyjnych pompy nazywa się jedną z zależności: $NPSE_{kr}(Q)$, $NPSE_{kr}(Q)$, $NPSE_{kr}(Q)$, $\sigma_{kr}(Q)$ lub $\sigma_{kr}(Q)$, obejmującą cały możliwy zakres pracy pompy. Przykładową charakterystykę tego typu $NPSE_{kr}(Q)$ pokazano na rys. 10.6. Dysponując taką charakterystyką, można dla każdego możliwego

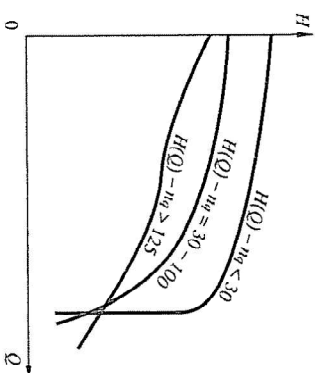


Rys. 10.6. Przykładowa charakterystyka własności antykawatcyjnych pompy

punktu pracy instalacji pompowej obliczyć H_{zr}^{max} lub H_{zr}^{min} , a tym samym sprawdzić, czy pompa pod względem swoich własności antykawatcyjnych jest właściwie dobrana do wymagań określonego układu. W przeciwnym razie należy dobrać inną pompę lub dostosować układ pompowy do wymagań pompy.

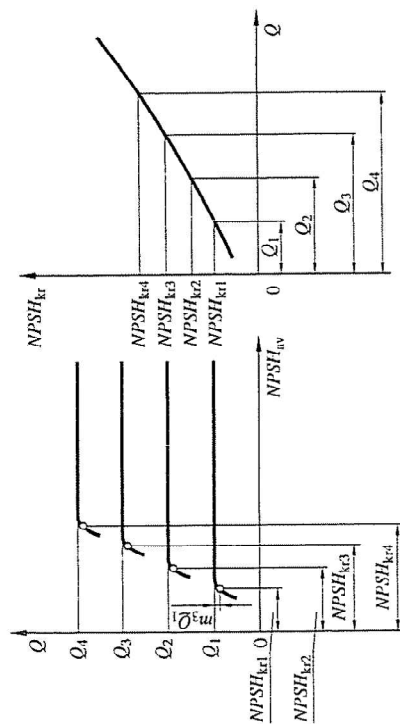
Krzywe rozwoju kawatcji (rys. 10.4) najszybciej i najdokładniej można wyznaczyć zmieniając w sposób ciągły poziom cieczy w zbiorniku dolnym (zmiana H_{zr} lub H_{zr}) lub ciśnienie P_s , jeśli jest to zbiornik zamknięty. Pomiar należy prowadzić począwszy od punktu dostatecznie odległego od umownego początku kawatcji, aby wystarczająco dokładnie określić położenie tej części charakterystyki, która jest równoległa do osi odciętych. Ze względu na kompletność oceny własności antykawatcyjnych pompy dobrze jest, aby krzywa rozwoju kawatcji obejmowała obszar załamania się charakterystyki. W celu zbudowania charakterystyki zbiorczej, np. $NPSE_{kr}(Q)$, wystarczy jednak, aby krzywa ta zawierała tylko część II fazy kawatcji.

Również charakterystyki przepływu przy występowaniu kawatcji można otrzymać, obniżając poziom cieczy lub ciśnienie w zbiorniku dolnym (rys. 10.5c). Przy mniej dokładnych pomiarach można zmniejszyć, za pomocą zaworu ssawnego, ciśnienie P_s (rys. 10.5b). W celu ustalenia maksymalnej dopuszczalnej wydajności pompy odpowiednią charakterystykę otrzymuje się przez stopniowe otwieranie zaworu tłocznego (rys. 10.5a).



Rys. 10.7. Wpływ wyróżnika szybkoobrotowości na załamanie się charakterystyki przepływu przy pracy w warunkach kawatcji

Omawiane charakterystyki są wygodne do interpretacji w przypadku pomp o niewielkich wyróżnikach szybkości, rzędu $n_q \leq 30$. Krzywa $H(Q)$ załamuje się wówczas bardzo ostro (rys. 10.7) i łatwo daje się ustalić umowny początek kawitacji. Przy większych wartościach wyróżników ($n_q = 30 + 100$) załamanie jest mniej gwałtowne, natomiast przy $n_q > \text{ok. } 125$ brak jest w ogóle wyraźnego punktu załamania.



Rys. 10.8. Wykorzystanie krzywych rozwoju kawitacji do zbudowania charakterystyki $NPSH_{kr}(Q)$

Charakterystyki własności antykawitacyjnych (rys. 10.6) buduje się, wykorzystując rodzinę charakterystyk omówioną uprzednio. Zastosowanie do tego celu krzywych rozwoju kawitacji pokazano na rys. 10.8. Dla kolejnych wydajności $Q_1, Q_2, Q_3, \dots$, zmieniając się nadwyżkę $NPSH_{kr}$ układu, np. przez obniżenie poziomu cieczy w zbiorniku dolnym. Obniżenie się krzywych o wartości odpowiednio $m_1 Q_1, m_2 Q_2, \dots$ (rys. 10.4d), wyznacza kolejne wartości krytyczne $NPSH_{kr}$ nadwyżek. Na tej podstawie sporządza się zbiorczy wykres $NPSH_{kr}(Q)$.

10.7. Wpływ warunków pracy pompy na powstanie kawitacji

U wlotu na łopatkę wirnika następuje spadek ciśnienia, zwany często *depresją dynamiczną*, określony wzorem

$$\Delta p = \rho \left(\frac{c_1^2 - c_{w1}^2}{2} + \zeta \frac{w_1^2}{2} \right),$$

gdzie c_{w1} — średnia prędkość przepływu w przekroju wlotowym wirnika, c_1, w_1 — odpowiednio: prędkość bezwzględna i względna u wlotu na łopatkę (rys. 3.10), ζ — współczynnik spadku ciśnienia u wlotu na łopatkę.

Przyjmując, że praktycznie cały spadek ciśnienia między punktami A i B (rys. 10.1) ma miejsce właśnie w obszarze wlotowym wirnika, tzn. pomijając straty ciśnienia w króćcu ssawnym, można napisać, że $p_s - p_B \approx \Delta p$.

Dla umownego początku kawitacji można więc w przybliżeniu napisać (p. 10.5)

$$\Delta p = \Delta p_{kr} \approx \rho \left(NPSH_{kr} - \frac{c_s^2}{2} \right),$$

z obu podanych wzorów wynika, iż

$$NPSH_{kr} \approx \frac{c_1^2}{2} - \frac{c_{w1}^2}{2} + \zeta \frac{w_1^2}{2} + \frac{c_s^2}{2}.$$

Przyjmując następnie $c_s \approx c_{w1}$, otrzymuje się ostatecznie

$$NPSH_{kr} \approx \frac{c_1^2}{2} + \zeta \frac{w_1^2}{2}. \quad (10.9)$$

Zatem zwiększenie prędkości cieczy c_1 i w_1 u wlotu na łopatkę wirnika związane jest z koniecznością powiększenia krytycznej, a stąd także i wymaganej przez pompę nadwyżki antykawitacyjnej, aby nie wystąpiła kawitacja.

Wzrost prędkości przepływu może nastąpić wskutek zwiększenia wydajności Q , spowodowanego wzrostem stopnia otwarcia zaworu tłocznego lub wzrostem prędkości obrotowej n pompy. Może być także wynikiem doboru pompy nieodpowiedniej do instalacji. Równoczesne powiększenie rozporządzalnej nadwyżki $NPSH_{av}$ instalacji nie jest na ogół możliwe. Po przekroczeniu pewnej granicznej wydajności $Q_{\max} = (1,3 \div 1,8) Q_n$ pojawia się więc intensywna kawitacja i dlatego praca pompy przy $Q > Q_{\max}$ jest niewskazana. Podobnie nie można nadmiernie powiększyć prędkości obrotowej.

Zwiększenie wymiarów i spowodowany tym wzrost parametrów pracy⁴⁾ pomp geometrycznie podobnych, tj. mających takie same wyróżniki szybkości n_q , prowadzi również do powiększenia wymaganej nadwyżki antykawitacyjnej. Bezpośrednią przyczyną powiększenia wartości $NPSH_{kr}$ jest proporcjonalny do wzrostu wymiarów wzrost prędkości w_1 i c_1 . Formalnie wzrost $NPSH_{kr}$ wynika bezpośrednio ze wzoru (10.7b), po uwzględnieniu faktu, że pompy o takim samym wyróżniku n_q mają jednakowe wartości wyróżników S .

Powstanie kawitacji może być także spowodowane zmniejszeniem się rozporządzalnej nadwyżki antykawitacyjnej $NPSH_{av}$ w układzie pompowym. Mogą ją spowodować następujące czynniki:

- a) nadmierny wzrost temperatury cieczy przetwarzanej i związany z nim wzrost wartości ciśnienia parowania p_b ,
- b) zmniejszenie się ciśnienia w zbiorniku dolnym, wskutek np. spadku ciśnienia atmosferycznego w otoczeniu zbiornika otwartego, spadku ciśnienia w odgazo-

⁴⁾ Powiększenie wymiarów wirnika w stosunku $\alpha = d'/d$ spowoduje powiększenie wydajności Q proporcjonalnie do α^3 oraz wysokości podnoszenia H proporcjonalnie do α^2 .