

Andrzej KORCZAK, Zbysław GONTARCZUK, Aleksander BIADACZ<sup>x)</sup>,  
Jan CZAJA<sup>x)</sup>, Krzysztof WDOWIAK<sup>x)</sup>

STANOWISKO BADAWCZE DO OKREŚLANIA ODPORNOŚCI  
MATERIAŁÓW NA DZIAŁANIE KAWITACJI I EROZJI

**Streszczenie:** Omówiono zagadnienie oceny odporności tworzyw konstrukcyjnych stosowanych w budowie pomp wirowych na działanie erozji i kawitacji i trudności w ocenie, spowodowane złożonością tych zjawisk. Opisano stanowisko badawcze pozwalające na modelowanie warunków pracy występujących w pompach wirowych i podano jego charakterystyki pracy oraz przykład wyników badań erozji piaskowej.

W niniejszej pracy omówiono trudności związane z badaniami odporności tworzyw konstrukcyjnych na działanie erozji i kawitacji oraz opisano stanowisko badawcze pozwalające na modelowanie warunków pracy występujących w pompach wirowych i podano jego charakterystyki pracy.

Badanie odporności materiałów konstrukcyjnych na działanie kawitacji i erozji jest bardzo złożone, bowiem na wynik wpływać będzie:

- skład chemiczny badanych materiałów,
- stan struktury powierzchni wynikający z technologii (np. odlewanie, kucie, obróbka mechaniczna, obróbka cieplna),
- rodzaj zjawiska niszczącego (erozja, korozja, kawitacja albo jednocześnie dwa lub trzy czynniki),
- charakter zjawiska (kawitacja może być przemieszczająca się, przyłączająca się, wirowa lub wibracyjna, erozja może być udarowa albo ścierająca),
- natężenie zjawiska oraz przy jednoczesnym występowaniu dwu lub trzech zjawisk, współzależność pomiędzy natężeniami poszczególnych czynników.

### 1. Kawitacja i erozja kawitacyjna

Jeżeli kawitacja, czyli zjawisko tworzenia się, a następnie zanikania wewnątrz poruszającej się cieczy, obszarów (pęcherzy) wypełnionych parą cieczy i wydzielającymi się z niej gazami odbywa się w sąsiedztwie ciał

<sup>x)</sup> Absolwenci Instytutu, których prace dyplomowe były związane z niniejszą publikacją.

stałych, to ulegają one erozyjnemu niszczeniu [11]. W czasie zanikania pęcherzy kawitacyjnych mającego charakter implozji, miejscowe ciśnienie, może osiągnąć wartości 3500 barów. Na skutek wielkiej częstotliwości implozji powierzchnie ciał stałych znajdujących się w obszarze kawitacyjnym są poddane działaniu fal ciśnieniowych o dużej częstotliwości. Niszczenie powierzchni narażonych na działanie tych fal ma charakter szczególnie, różny od zniszczeń spowodowanych korozją lub erozją [11].

Zjawiska kawitacji wizualnie są do siebie podobne i przedstawiają "rozmyty obłok piany". Warunki powstawania i zanikania kawitacji mogą się różnić, zależy to od jej charakteru, zawartości zanieczyszczeń stałych w cieczy oraz od ilości rozpuszczonych w niej gazów, jak również od kształtu kanału, przez który przepływa ciecz.

Kawitację można podzielić na występującą: w strumieniu, na ściankach nieruchomych, na ściankach poruszających się w cieczy i przy braku strumienia głównego. Istotne cechy zjawiska ujmując podział na kawitację niestacjonarną i pseudostacjonarną. Podział według właściwości fizycznych dokonuje się następująco [1]:

- a) kawitacja przemieszczająca się, przy której w cieczy tworzą się oddzielne niestacjonarne jamy albo pęcherze poruszające się razem z cieczą równocześnie rozszerzając się, zmniejszając, a następnie zanikając,
- b) kawitacja przyłączająca się, przy której pęcherze pokrywają ściankę omiwanego ciała oddzielając na tej powierzchni strumień główny od ścianki. Nieruchoma lub przyłączona przestrzeń pary jest stała w sensie pseudostacjonarnym. Jej granica jest powierzchnią intensywnie kipiącą i burzliwą. W niektórych przypadkach powierzchnia pęcherza może być gładka i przezroczysta. Gdy pęcherze pokrywają całe obmywane ciała zanikają za nim, to zjawisko określa się mianem superkawitacji,
- c) kawitacja wirowa, przy której pęcherze par i gazów "kawerny" tworzą się w środkach wirów w strefach, w których występują duże gradienty prędkości,
- d) kawitacja wibracyjna, w której powstawanie i zanikanie pęcherzy spowodowane drganiem ściany w kierunku cieczy, w której jest zanurzona, wywołuje wahania ciśnienia o wysokiej częstotliwości. Zjawisko może występować bez przepływu cieczy. Tego typu kawitacja występuje na powierzchni cylindrów silników spalinowych chłodzonych wodą [2]. Zanikanie pęcherzy par i gazów przy ściankach ciał stałych powoduje niszczenie ich powierzchni.

## 2. Zjawisko erozji

Erozja w maszynach hydraulicznych jest problemem podstawowym w pompach wirowych do transportu rozdrobionych ciał stałych o własnościach ścierających.

Zjawisko erozji piaskowej jest również złożone, co wynika zarówno z samego mechanizmu odkształcania i odrywania cząstek materiału ścianki przez uderzające ziarna ciał stałych zawartych w cieczy, jak i wpływu mikrostruktury ścianki oraz kształtu i rodzaju transportowanych ciał stałych.

Otarcie twardego ziarna o kształcie np. kulistym o ściankę deformowaną sprężystość lub plastycznie powoduje, że materiał ścianki jest ściskany przed ziarnem, a rozciągany za nim pod wpływem sił tarcia. Ten mechanizm powoduje oderwanie cząstek ścianki, po którymś kolejnym otarciu. Występuje to na skutek zmęczenia materiału [3]. Ziarno wgniata się w ściankę na głębokość zależną od kąta padania, szybkości, masy i wielkości ziarna oraz sprężystości ścianki, zaś na skutek tarcia zmniejsza się jego prędkość styczna.

Po wyhamowaniu ziarno jest wyrzucane siłami sprężystości odkształconej ścianki [4]. Przy takim modelu erozji zakłada się, że nie występuje niszczenie udarowe, co jest możliwe przy względnie niewielkim ziarnie. Wpływ wielkości ziarna na erozję był przez jednych badaczy zauważany [5, 8] a inni nie stwierdzali takiej zależności [6]. Wynika to z różnych zakresów parametrów badanego zjawiska.

Przy bezudarowej teorii erozji można określić kąt natarcia, przy którym niszczenie ścianki będzie maksymalne [4]. Przy prostopadłym uderzaniu ziarna o ściankę erozja zaniknie. Bezudarowa teoria erozji jest słuszna przy drobnoziarnistej strukturze materiału ścianki i niezbyt dużej energii kinetycznej ziaren. Przejście od tarcia posuwistego do potoczystego powinno znacznie obniżyć stan naprężeń w ściance i fakt ten można zilustrować przykładem dobrej odporności gumy na erozję przy niezbyt dużej wielkości ziaren (stwierdzenie mgr inż. Józefa Czepiela).

Na intensywność erozji obok jej mechanizmu istotny wpływ ma mikrostruktura ścianki, wielkość i twardość poszczególnych jej składników, a ponadto twardość i kształt (ostrość) ziaren ścierających. Badania erozji różnych metali piaskiem kwarcowym z wodą, przeprowadzone przez W.F. Lorenca, M.M. Tanenbauma, W.A. Stauffera i W.D. Żigajewa wykazały, że w liniowej zależności odporności metalu na erozję od twardości można mówić tylko wówczas, gdy twardość ścianki jest znacznie mniejsza od twardości ziarna i materiał ścianki jest drobnoziarnisty [7].

### 3. Równoczesna kawitacja i erozja

W procesie jednoczesnego działania kawitacji i erozji na powierzchni elementów maszyn hydraulicznych działają równocześnie siły hydrodynamiczne spowodowane zanikaniem pęcherzyków pary oraz uderzaniem cząstek stałych zawartych w cieczy o ścianki kanałów. W rezultacie zależnie od stopnia rozwoju kawitacji, koncentracji ciał stałych w strumieniu cieczy, odporności materiałów elementów pompy, charakter i prędkość ubytku materia-

ku może się zmieniać według różnych zależności. Na podstawie badań [9,10] wykazano, że ciała stałe w strumieniu mogą obniżać lub zwiększać intensywność niszczącego działania kawitacji przepływowej.

W efekcie erozji następuje szlifowanie i pelerowanie powierzchni ścianki, co uodparnia ją na działanie kawitacji przepływowej. Efekt ten może przeważać do momentu, gdy natężenie kawitacyjnego niszczenia ścianki jest większe od erozyjnego. Przy wzroście koncentracji ciał stałych może wystąpić efekt wzmożonego jednoczesnego niszczącego działania obu czynników. Obniżenie intensywności niszczącego działania kawitacji przepływowej zaobserwowano przy stężeniach objętościowych ciał stałych w wodzie od 0,1 do 0,5% [10].

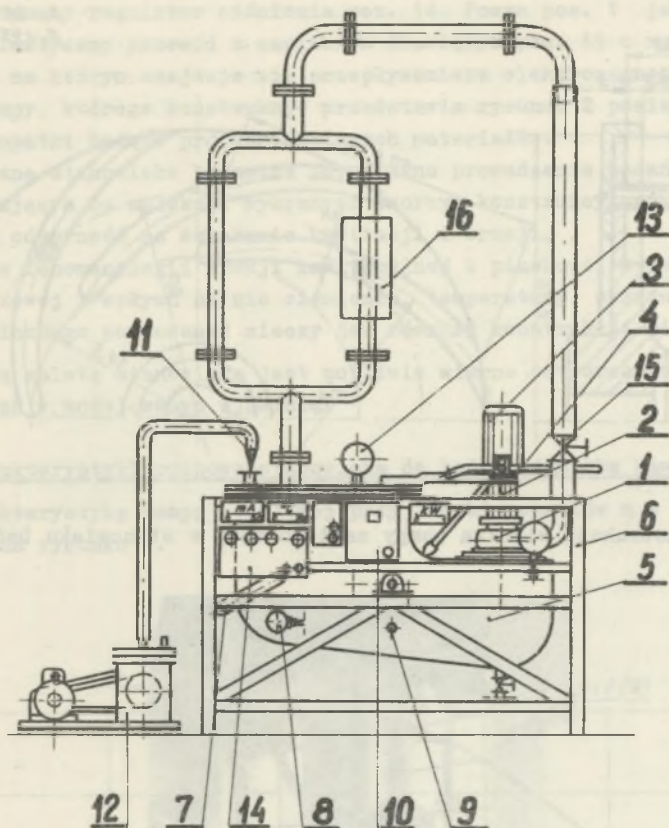
Wyniki systematycznych i obszernych badań odporności tworzyw konstrukcyjnych na niszczące równoczesne działanie kawitacji i erozji są publikowane w ostatnich latach. Można przytoczyć prace dotyczące erozji w obszarze kawitacji przepływowej realizowane w tunelu hydrodynamicznym [10] oraz badania erozji w obszarze kawitacji wibracyjnej na stanowisku, w którym próbka umieszczana jest na końcu koncentratora urządzenia magnetycznego zanurzanego w wirującym strumieniu wody z piaskiem [12].

Złożoność zjawiska erozji i kawitacji powoduje, że uzyskiwane na różnych instalacjach badawczych wyniki i wnioski mogą być słuszne w pełni tylko w warunkach identycznych jak występujące w czasie badań. Formułowanie kryteriów podobieństwa dla tych zjawisk jest przy aktualnym stanie wiedzy zbyt dużym uproszczeniem zagadnienia.

W praktyce obok erozji i kawitacji często występuje korozja intensyfikowana usuwaniem przez erozję pasywisujących warstw związków chemicznych. Badając odporność tworzyw konstrukcyjnych na działanie erozji i kawitacji należałoby stosować ciecz chemicznie obojętną w stosunku do niszczonego materiału, co z drugiej strony jest sprzeczne z praktycznymi warunkami ich pracy. Celem konstrukcji specjalnych stanowisk badawczych jest przede wszystkim znaczne przyspieszenie uzyskania wyników badań i możliwość porównania odporności różnych materiałów.

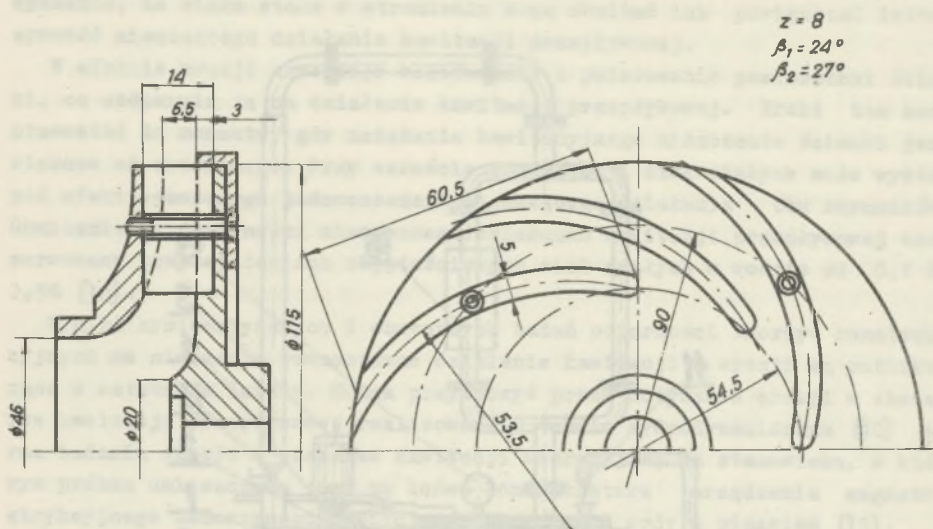
#### 4. Opis stanowiska badawczego zastosowanego do badań odporności tworzyw konstrukcyjnych na niszczące działanie erozji i kawitacji

W Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej zbudowano stanowisko badawcze umożliwiające badanie odporności tworzyw konstrukcyjnych na działanie erozji, kawitacji oraz równoczesnej erozji i kawitacji w warunkach występujących w wirnikach pomp wirowych, które są ze wszystkich elementów układów hydraulicznych najbardziej narażone na zużycie.

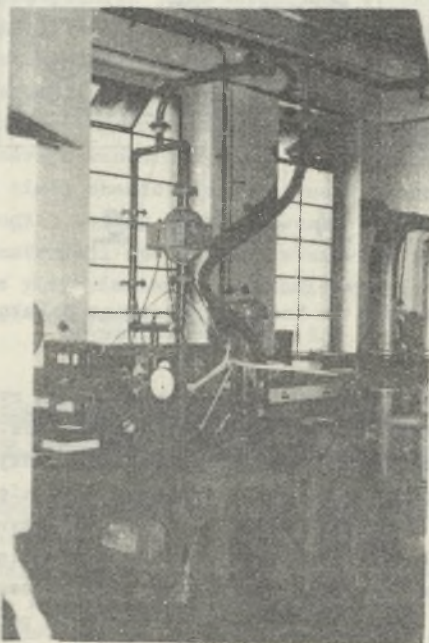


Rys. 1. Schemat stanowiska do badań niszczącego działania kawitacji i erozji w pompach wirowych

Stanowisko badawcze, którego schemat pokazano na rysunku 1, a widok na rysunku 3, stanowi układ pompowy obiegowy z pompą poz. 1 pracującą z napływem [15]. Pompa zawieszona jest ze wspornikiem łożyskowym poz. 2 i silnikiem poz. 3 na podporze poz. 4 posiadającej dźwignię do podnoszenia zespołu pompowego przy demontażu wirnika. Wspornik łożyskowy posiada płaszcz wodny do chłodzenia łożysk przy pracy układu w wysokich temperaturach. Pompa jest zabudowana na zbiorniku zamkniętym poz. 5 osadzonym w ramie poz. 6, w której można go przechylać w celu opróżnienia pompy z wody i w odpowiednim położeniu przytrzymać uchwytem poz. 7. W zbiorniku poz. 5 znajduje się trójfazowy grzejnik o mocy 6 kW poz. 8 i termoelement poz. 9 połączone z dwupołożeniowym regulatorem temperatury poz. 10.



Rys. 2. Konstrukcja wirnika pompy zastosowanej w stanowisku badawczym



Rys. 3. Widok stanowiska badawczego

W celu regulacji ciśnienia zbiornik połączony jest poprzez zawór zwrotny poz. 11 z pompą próżniową poz. 12 uruchamianą wakuometrem kontaktowym poz. 13 poprzez regulator ciśnienia poz. 14. Pompa poz. 1 jest połączona poprzez elastyczny przewód z zaciskiem dławicowym poz. 15 z rurociągiem obiegowym, na którym znajduje się przepływomierz elektromagnetyczny poz. 16. Wirnik pompy, którego konstrukcję przedstawia rysunek 2 posiada jednokrzywiznowe łopatki będące próbkami badanych materiałów.

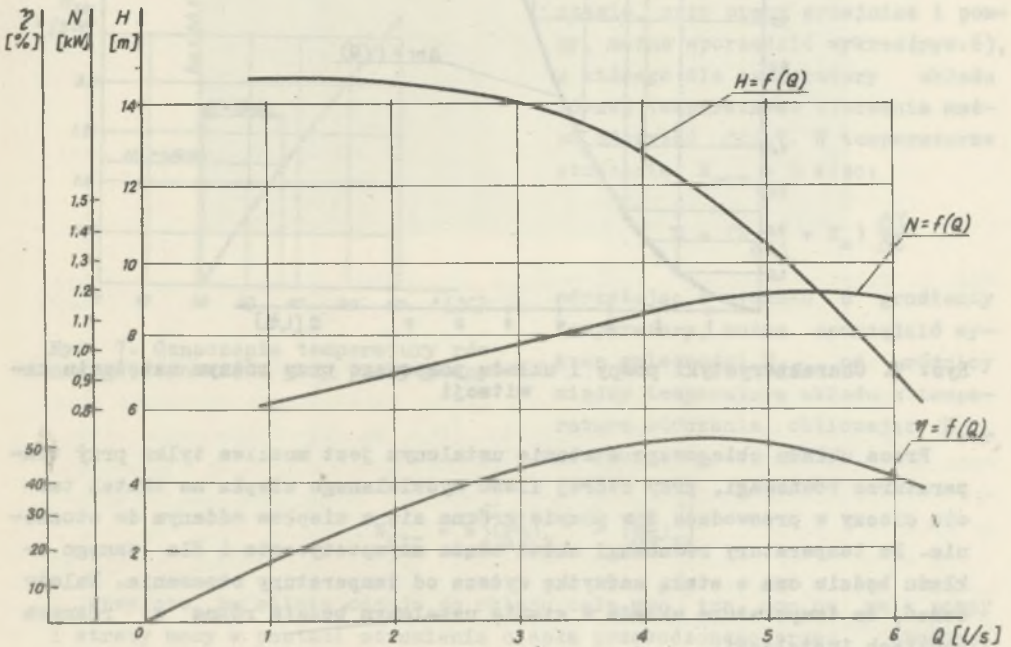
Zbudowane stanowisko badawcze pozwala na prowadzenie badań w kierunku:

- zmierzającym do selekcji wybranych tworzyw konstrukcyjnych ze względu na ich odporność na działanie kawitacji i erozji,
- badania fenomenologii erozji kawitacyjnej i piaskowej w pompie wirowej odśrodkowej i wpływu na nie ciśnienia, temperatury, składu fizycznego i chemicznego pompowanej cieczy jak również konstrukcji wirnika.

Zasadniczą zaletą stanowiska jest możliwie wierne odtworzenie warunków występujących w modelowanym zjawisku.

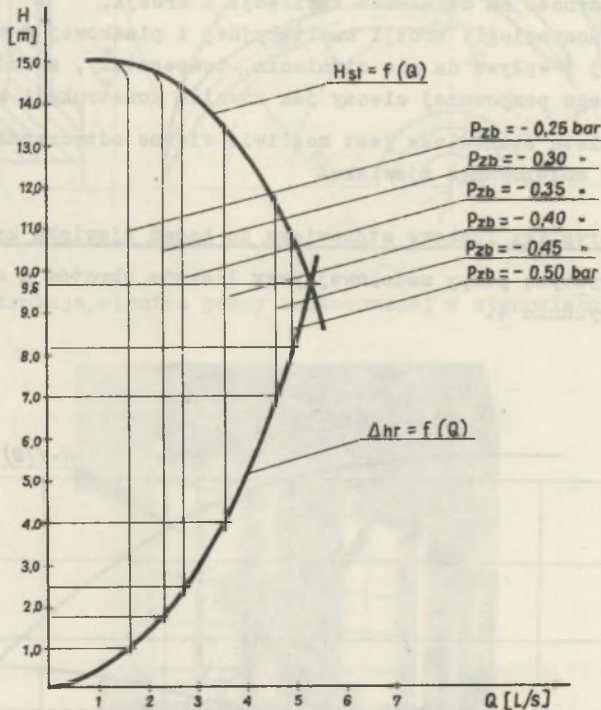
#### 4.1. Charakterystyki ruchowe stanowiska do badań zjawiska kawitacji

Charakterystykę pompy modelowej przy liczbie obrotów  $n = 2870 \text{ min}^{-1}$  pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Charakterystyka pompy modelowej

Optymalne parametry pracy pompy wynoszą  $Q = 4,3 \text{ l/s}$ ,  $N = 1180 \text{ W}$ ,  $H = 12,4 \text{ m}$ ,  $\eta = 49\%$  odpowiada to kinematycznemu wyróżnikowi szybkobieżności  $n_{sQ} = n Q^{1/2} H^{-3/4} = 28,5$  z czego wynika, że jest to pompa wirowa odśrodkowa z wirnikiem normalnobieżnym. Dzięki pracy pompy z napływem nie występuje niebezpieczeństwo zerwania słupa cieczy przy intensywnej kawitacji. Na rysunku 5 przedstawiono charakterystyki pompy i układu pompowego przy różnych natężeniach kawitacji zmieniających podciśnieniem w zbiorniku przy temperaturze wody w obiegu  $t = 70^\circ\text{C}$ .

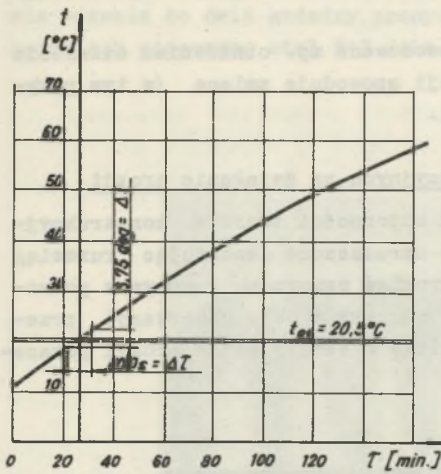


Rys. 5. Charakterystyki pompy i układu pompowego przy różnym natężeniu kawitacji

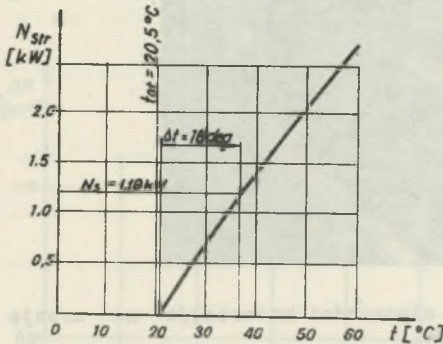
Praca układu obiegowego w stanie ustalonym jest możliwa tylko przy temperaturze równowagi, przy której ilość wydzielanego ciepła na skutek tarcia cieczy w przewodach i w pompie zrówna się z ciepłem oddanym do otoczenia. Do temperatury równowagi układ zdąża asymptotycznie i dla danego układu będzie ona o stałą nadwyżkę wyższa od temperatury otoczenia. Należy dodać, że temperatura układu w stanie ustalonym będzie różna w różnych punktach instalacji.

Dzięki zastosowaniu regulatora temperatury można układ szybko doprowadzić do temperatury równowagi i badania materiałów prowadzić przy tej temperaturze.





Rys. 6. Temperatura stanowiska w zależności od czasu grzania przy pracy i bez pracy pompy



Rys. 7. Oznaczenia temperatury równowagi stanowiska przy pracy pompy

Temperaturę równowagi układu pompowego obiegowego można wyznaczyć z bilansu

$$N_{grz} + N_s = N_u + N_{str},$$

gdzie:

- $N_{grz}$  - moc grzejnika,
- $N_s$  - moc silnika,
- $N_u$  - moc oddawana do układu,
- $N_{str}$  - moc oddawana do otoczenia.

Pojemność cieplną układu  $W$  można określić ze wzoru:

$$N_u = W \frac{\Delta t}{\Delta \tau},$$

gdzie:

$\Delta t$  - przyrost temperatury w czasie  $\Delta \tau$ .

Mierząc temperaturę układu w czasie, przy pracy grzejnika i pompy, można sporządzić wykres (rys.6), z którego dla temperatury układu równej temperaturze otoczenia można odczytać  $\Delta t / \Delta \tau$ . W temperaturze otoczenia  $N_{str} = 0$  więc:

$$W = (N_{grz} + N_s) \frac{\Delta \tau}{\Delta t}$$

odczytując z rysunku 6 gradienty temperatury, można sporządzić wykres zależności  $N_{str}$  od różnicy między temperaturą układu a temperaturą otoczenia, obliczając  $N_{str}$  ze wzoru:

$$N_{str} = W \left[ \left( \frac{\Delta t}{\Delta \tau} \right)_{t_{ot}} - \left( \frac{\Delta t}{\Delta \tau} \right) \right]$$

Przyjęto, że silnik oddaje do układu całą moc, tzn. moc na wale pompy i straty mocy w postaci strumienia ciepła przewodzonego przez obudowę, temperatura układu będzie, gdy

$$N_{str} = N_s$$

co w omawianym przykładzie odpowiada temperaturze 16 deg wyższej od temperatury otoczenia (rys. 7).

Ponadto zmiana mocy na wale pompy spowodowana np. obniżeniem ciśnienia w zbiorniku i wzrostem natężenia kawitacji spowoduje zmianę (w tym przykładzie obniżenie) temperatury równowagi.

#### 4.2. Badanie odporności tworzyw konstrukcyjnych na działanie erozji

Opisane stanowisko badawcze dla badań odporności tworzyw konstrukcyjnych na działanie samej erozji piaskowej uproszczono demontując rurociąg stalowy z przepływomierzem i kierując strumień przewodem gumowym z powrotem do zbiornika, który został częściowo odkryty w celu obserwacji przepływu mieszaniny wody z piaskiem. Stanowisko w czasie badań erozji pokazano na rysunku 8.



Rys. 8. Widok stanowiska w czasie badań odporności materiałów na erozję piaskową

Kształt charakterystyki pompy pompującej wodę z piaskiem zmienia się, tzn. wysokość podnoszenia obniży się i zakres maksymalnych sprawności przesunie się w kierunku niższych wydajności [16]. Na skutek skrócenia przewodu tłocznego, mimo wzrostu oporów przepływu mieszaniny wody z piaskiem, wysokość podnoszenia układu pompowego wynosiła 7 m sł. wody, zaś pobór mocy wynosił 1230 W.

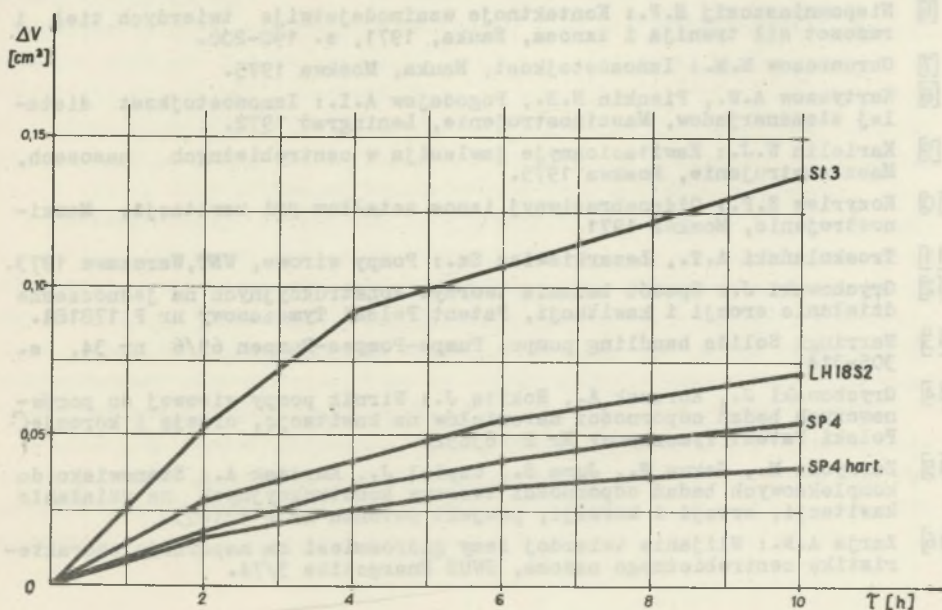
Do badań użyto piasek kwarcowy o symbolu 1K-70/100/50-M70 w ilości 25 kg w obiegu, co dawało średni stosunek objętościowy piasku do wody 1:5 przy założeniu, że sedymentacja była pomijalna.

Na rysunku 9 pokazano próbki badanych materiałów (St3, Sp4, LH18S2, Sp4 hart) po 10 godzinach pracy. W badaniach stosowano po dwie próbki z każdego badanego materiału w celu zmniejszenia błędów - pomyłek. Na wykresie

(rys. 10) przedstawiono objętościowe ubytki badanych materiałów na podstawie ważenia co dwie godziny pracy. W podanym przykładzie jak i w innych badaniach stosowano stal St3 jako materiał porównawczy. Z wykresów objęto-



Rys. 9. Próbkki badanych materiałów St3, Sp4, LH18S2, Sp4 hart. po 10 godzinach pracy przy erozji piaskowej



Rys. 10. Wykres objętościowego ubykania próbek pod działaniem erozji w pompie

ściowego ubywania próbek w czasie wynika, że przy pompowaniu mieszaniny z tym samym piaskiem gradient ubytku objętości próbek maleje na skutek stępienia się ziaren piasku, dlatego dla każdej kolejnej grupy badanych materiałów wymieniano piasek.

Badania charakterystyk opisanego w artykule stanowiska badawczego jak i przeprowadzone badania tworzyw konstrukcyjnych na działanie kawitacji i erozji, wykazały jego uniwersalność pozwalającą na realizację różnie formułowanych programów badań.

#### LITERATURA

- [1] Knapp R.T., Daily J.W., Hammit F.G.: Cavitation, Mc Graw-Hill Book-Company, 1970.
- [2] Polipanow J., Pomiszenko A.: Wlijanije dawlenija w sistemie ochładzdenija DWS na intensiwnost kawitacionnych razruszenij cylindrowych wtukok, Energomaszinstrojenie, 6/76.
- [3] Niepomniaszczij E.F. i inni: Modelirowanie trenija i iznosa, M.Niimasz, 1970, s. 236-246.
- [4] Makarow W.N.: Raczhet erozionnogo iznosa elementów energiticeskogo oborudowanija, Energomaszinstrojenie, 5/76.
- [5] Majew E.W.: Iznos i trenije metałłow i płastras, Nauka, 1964, s. 52-65.
- [6] Niepomniaszczij E.F.: Kontaktnoje wzaimodejstwije twierdych tieł i raczhet sił trenija i iznosa, Nauka, 1971, s. 190-200.
- [7] Chruszczow M.M.: Iznosostojkost, Nauka, Moskwa 1975.
- [8] Kartyszow A.W., Pienkin N.S., Pogodajew A.I.: Iznosostojkost dietałej ziemnarjadow, Maszinstrojenie, Leningrad 1972.
- [9] Karielin W.J.: Kawitacionnyje jawlenija w centrobieżnych nasosach, Maszinstrojenie, Moskwa 1975.
- [10] Kozyriew S.P.: Gidroabraziwnyj iznos metałłow pri kawitacii, Maszinstrojenie, Moskwa 1971.
- [11] Troskolański A.T., Łazarkiewicz Sz.: Pompy wirowe, WNT, Warszawa 1973.
- [12] Grychowski J.: Sposób badania tworzyw konstrukcyjnych na jednoczesne działanie erozji i kawitacji, Patent Polski Tymczasowy nr P 178184.
- [13] Warring: Solids handling pumps, Pumps-Pompes-Pumpen 69/6 nr 34, s. 305-314.
- [14] Grychowski J., Korczak A., Rokita J.: Wirnik pompy wirowej do porównawczych badań odporności materiałów na kawitację, erozję i korozję, Polski Patent Tymczasowy Nr P 163652.
- [15] Zarzycki M., Sakwa W., Jura S., Czpiel J., Korczak A.: Stanowisko do kompleksowych badań odporności tworzyw konstrukcyjnych na działanie kawitacji, erozji i korozji, projekt patentu nr P 121695.
- [16] Zarja A.N.: Wlijanie twierdój fazy gidrosmesi na napornuju charakteristiku centrobieżnogo nasosa, IWUZ Energetika 3/74.

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ  
НА ВОЗДЕЙСТВИЕ КАВИТАЦИИ И ЭРОЗИИ

## Р е з ю м е

Обсуждено проблемы связанные с оценкой прочности конструкционных материалов на воздействие эрозии и кавитации, ввиду сложности явлений.

Описано испытательный стенд дающий возможность моделировать условия работы выступающие в лопастных насосах и подано его характеристику работы.

RESEARCH STATION FOR DETERMINING OF MATERIAL  
RESISTANCE TO EROSION AND CAVITATION

## S u m m a r y

The problems connected with the evaluations of the resistance of constructional materials to erosion and cavitation caused by complexity of these phenomena have been discussed.

The research stations enabling the forming of work conditions existing in impeller pumps has been described and its work characteristics have been given.