

Bolesław G. Gireń,
Marzena Noińska-Macińska,

Kawitacyjne niszczenie łopatek w turbinie Banki-Michela. Obserwacje i wybrane aspekty symulacji procesu

Słowa kluczowe: turbina Banki-Michela, erozja kawitacyjna, prognozowanie zużycia

Streszczenie.

Praca dotyczy przewidywania kawitacyjnego niszczenia łopatek turbiny Banki-Michela w oparciu o fenomenologiczny symulacyjny model erozji. Badania eksperymentalne prowadzono w elektrowni wodnej w Jezioranach (Polska). Metodyka badań polegała na wyznaczeniu krzywych erozyjnych zużycia łopatek turbiny, wyznaczeniu odpowiadających im krzywych modelowych poprzez odpowiedni dobór parametrów obliczeniowych oraz dokonaniu analizy uzyskanych korelacji. Ustalono, że zależność parametrów równań modelowych od obciążenia jest niewielka, wobec czego w procedurze przewidywania obciążenie może być uwzględniane jako mnożnik.

1. Wprowadzenie

1.1. Uzasadnienie prac badawczych

Istotnym warunkiem utrzymania stanu poprawnego funkcjonowania małych elektrowni wodnych jest efektywne i dokładne rejestrowanie zagrożeń, związanych z występowaniem zjawisk kawitacyjnych i abrazyjnych w obszarach przepływowych monitorowanych maszyn [2]. Śledzenie tempa niszczenia takich podzespołów hydroturbin, jak łopatki, kierownice, wały, obudowy i inne w trakcie ich eksploatacji odbywa się w zasadniczej mierze poprzez detekcję uszkodzeń, a w czasie pracy urządzenia – poprzez rejestrację sygnału emisji akustycznej. Występująca w praktyce inżynierskiej potrzeba przewidywania efektywności procesów zużycia ubytkowego napotyka na brak skutecznych narzędzi do realizacji tego celu. Dostępne, fenomenologiczne modele erozji i ich implementacje nie zawsze odpowiadają szczegółowym potrzebom aplikacyjno-inżynierskim. W szczególności dotyczy to, w wielu wypadkach złożonych i pozytywnie zweryfikowanych modeli kawitacyjnego niszczenia materiałów (np. [5,6,9,16,18,21, 23,27,31]) oraz metod prognozowania erozji kawitacyjnej opartych na skalowaniu [22,30]. Tworzenie systemu prognozowania losowych procesów ubytkowych na podstawie znanych matematycznych modeli procesów niszczenia wymaga określenia granic jego stosowalności, w szczególności w odniesieniu do rzeczywistych warunków pracy hydrozespołu. Próby urzeczywistnienia takiego narzędzia w odniesieniu do turbiny Francisca podjęto m.in. w pracach [4,7].

W niniejszej pracy przedstawiono wstępne badania weryfikujące poprawność symulacji procesu kawitacyjnego niszczenia łopatek turbiny Banki za pomocą systemu prognostycznego, opartego na modelach opisanych w pracach [11,12] i na ich implementacji obliczeniowej [13]. Zadaniem systemu prognostycznego in spe jest przewidywanie przebiegu erozji kawitacyjnej i abrazyjnej oraz uzyskiwanie i analiza różnych rozwiązań projektowych: poprzez dobór materiałów i warunków obciążeń. Podstawowe funkcje symulatora, stanowiącego element obliczeniowy systemu obejmują

wyznaczanie i modyfikacje krzywych erozyjnych, określanie trybów niszczenia, rozkładów prawdopodobieństwa procesów składowych oraz obciążeń. System wymaga znajomości rzeczywistych obciążeń erozyjnych. Ich identyfikacja następuje w wyniku pomiarów. Oszacowanie wartości obciążenia na podstawie obliczeń modelowych dla przepływu dwufazowego przy określonej geometrii przepływu jest zadaniem na tyle trudnym, że nie doczekało się jeszcze satysfakcjonującej realizacji.

Ewentualne korzyści, wynikające z wykorzystania systemu związane są z uzyskaniem redukcji kosztów projektowania, modelowania i prototypowania, a ponadto kosztów przeglądów i kosztów remontowych turbin.

1.2. Przedmiot badań.

Turbiny Banki-Michella z przepływem poprzecznym charakteryzują się sprawnością: od 70 do 80% w zakresie wydatku masowego od 30% do 100% wartości przepływu maksymalnego. Mogą być stosowane zarówno przy niskich, jak i wysokich spadach (1-200 m) [10]. Energia strumienia przekazywana jest w różnych fazach opływu łopatom znajdującym się w położeniu górnym i łopatom znajdującym się w położeniu dolnym. Na ukształtowanie przepływu wody wpływ ma budowa geometryczna urządzenia, w szczególności budowa i położenie kierownicy oraz korpusu regulacyjnego, a także prędkość i natężenie przepływu na wlocie. Warunki pracy i parametry turbin należących do typoszeregu, opisanego w [24] przyjmują wartości: spad 7-30 m, przepływ 0,07-1,5 m³/s, moc 5-200 kW, dynamiczny wyróżnik szybkobieżności $n_{sn}=114$.

Podczas rocznego cyklu pracy maszyny spodziewane jest powstanie warunków sprzyjających rozwojowi kawitacji: (1) wygenerowanie obłoków kawitacyjnych w strefie dyfuzyjnej nad powierzchnią łopatek oraz (2) wygenerowanie mikrostrug z pęcherzykami kawitacyjnymi, rozwijającymi się w jądrach wirów. Możliwe przyczyny powstawania obciążeń kawitacyjnych [20,24]:

- (a) wewnątrz turbiny i w obszarze międzyłopatkowym, zawartym w strefie obrotu 270° - 360° (liczone od poziomej osi napływu) następuje silne obniżenie ciśnienia i powstanie wirów, które wchodzi w strefę podwyższonego ciśnienia w sąsiedztwie kierownicy (a w dalszej kolejności w sąsiedztwie ostrogi), gdzie dochodzi do bezpośredniego działania erozyjnego na krawędzie łopatek;
- (b) część wygenerowanych wirów przemieszcza się wraz z przepływem wewnątrz turbiny i dociera do przeciwległej palisady łopatek, gdzie również może dojść do zamknięcia kawitujących struktur w strefie podwyższonego ciśnienia. Proces zależny będzie od charakterystyki przepływu i związanej z tym prędkości obrotowej wirnika. Może m.in. powstawać obłok ze strefą zaniku nad linią obrotu krawędzi łopatek;
- (c) bezpośrednią przyczyną zjawiska powstawania mikrostrumieni mogą być uszkodzenia kierownicy, a zwłaszcza przewężenia w obszarze wylotu. Do erozji dochodzi na wypukłych powierzchniach łopatek oraz na krawędzi natarcia.

Możliwość pojawienia się zjawiska kawitacji w konkretnych przypadkach oceniana jest na podstawie wyliczonych wartości liczby kawitacyjnej w różnych punktach pracy turbiny. Obserwowane uszkodzenia łopatek, wywołane działaniem kawitacji, to w głównej mierze wykruszenia o nieregularnym rozkładzie powierzchniowym i wgłębnym. W przypadku działania strug kawitacyjnych, wżery mogą mieć lokalnie znaczną głębokość (do 2-3 mm). Przy wysokim stopniu zaawansowania procesu zużycia, tego rodzaju uszkodzenia zagrażać mogą integralności niszczonego elementu.

Niszczenie wywołane działaniem obciążeń o charakterze kawitacyjnym składa się z kilku etapów: obejmuje fazę zmian mikrostruktury i stanu materiału, w której pojawiają się i

łączą mikropęknięcia (okres inkubacyjny), fazę przyspieszonej erozji oraz fazę quasi-jednostajnego niszczenia (przy zachowaniu uśrednionej równowagi), w którym istotną rolę odgrywają zjawiska hamujące, takie, jak np. zamykanie pęknięć.

1.3. Cel pracy

Celem niniejszych badań jest sprawdzenie niektórych aspektów przewidywania intensywności niszczenia łopatek turbiny B-M w oparciu o model symulacyjny erozji, przedstawiony w pracy [11]. Wyniki badań stanowią przyczynek do rozwoju obliczeniowego narzędzia oceny efektywności procesów zużycia w aspekcie aplikacyjnym. W szczególności celem pracy jest potwierdzenie tezy, że metoda kwantyfikacji za pomocą modelu deterministycznego, w którym parametry obliczeniowe związane są z właściwościami niszczonego materiału, a obciążenia mają charakter skalujący jest wystarczająco skutecznym sposobem opisu procesu erozji w warunkach eksploatacyjnych.

1.4. Metodyka

Metodyka badań polegała na wyznaczeniu, w warunkach pracy hydrozespołu, krzywych erozyjnych zużycia łopatek turbiny, wykonanych z dwóch różnych materiałów, wyznaczeniu odpowiadających im krzywych modelowych poprzez odpowiedni dobór parametrów obliczeniowych (parametrów równań modelowych) oraz dokonaniu analizy uzyskanych korelacji.

1.5. Zakres prac

Zakres prac badawczych obejmował: (1) przygotowanie łopatek do badań, (2) wykonanie pomiarów ubytków objętości wybranych obszarów łopatek podczas przeglądów etapowych - stosowano metodę odciskową wyznaczania morfologii zniszczonej powierzchni łopatki, (3) dokonanie aproksymacji krzywych eksperymentalnych krzywymi teoretycznymi poprzez dobór wartości parametrów równań modelowych, (4) ocenę błędów i niepewności.



Rys. 1. Wykorzystana w badaniach turbina o maksymalnej mocy 13 kW.

2. Badania eksperymentalne

2.1. Procedury pomiarowe

Badania prowadzono w hydrosiłowni w Jezioranach - obiekt hydrotechniczny zlokalizowany jest w biegu rzeki Symsarny. Funkcjonuje w obrębie kompetencyjnym Zakładu Energetycznego S.A. w Olsztynie - posterunek energetyczny Jeziorany, ul.

Kościuszki 24, 11-320 Jeziorany. Warunki pracy hydrozespołu określone są poprzez spad strumienia wody, który wynosi 9 m oraz zmienny wydatek masowy wody. Przepływ zależy od warunków hydrometeorologicznych w zlewni. Jego średnia wartość, oszacowana w okresie 4 lat (2005-2009) wynosiła 0,2 m³/s. Obiektem badanym była turbina przepływowa Banki-Michella (Rys.1), posadowiona w układzie z dopływem poziomym, w której strumień wody przepływa dwukrotnie przez palisadę wirnika. Zainstalowano 1-łopatkową kierownicę. Dostosowanie turbiny do różnych natężeń przepływu osiągnięto poprzez odpowiedni podział wirnika i kierownicy. Długość łopatek i średnica wirnika wynosiły odpowiednio 15 cm i 25 cm. Wypływ wody następuje przez króciec wylotowy zakończony rurą ssawną. W obszarze wypływu znajdują się zawory napowietrzające.

Do badań wytypowano 6 łopatek, które, w celu ustalenia przebiegu pełnego cyklu niszczenia zregenerowano za pomocą metody elektrodowego napawania. Zakwalifikowano łopatki usytuowane naprzemianlegle wobec osi wirnika. Powierzchnie wypukłe i obszar sąsiadujący z krawędzią natarcia trzech spośród wybranych łopatek pokryto materiałem drutu spawalniczego SP-1. Powierzchnie wypukłe i obszar sąsiadujący z krawędzią natarcia pozostałych łopatek pokryto materiałem elektrod EB-150. Nadmiar materiału zeszlifowano. Odtworzono w przybliżeniu pierwotne profile, ale ze względu na brak dalszej obróbki wykończającej chropowatość zregenerowanych łopatek była znaczna. Nie przeprowadzono cieplnej obróbki odpuszczającej co nie pozostało bez wpływu na rozwój procesu niszczenia materiału w warunkach działania obciążeń kawitacyjnych. Do obserwacji i analizy ilościowej wybrano trzy obszary pomiarowe na wypukłej powierzchni łopatki, o powierzchni 2 cm² każdy. Łączna liczba godzin pracy turbiny wyniosła: 10512.

2.2. Wyznaczenie krzywych erozyjnych

Krzywe erozyjne wyznaczono poprzez pomiary ubytków objętości bryły łopatki po 164, 284 i 438 dniach eksploatacji. Oceny stopnia zniszczenia łopatek dokonano poprzez zastosowanie następujących metod diagnostycznych:

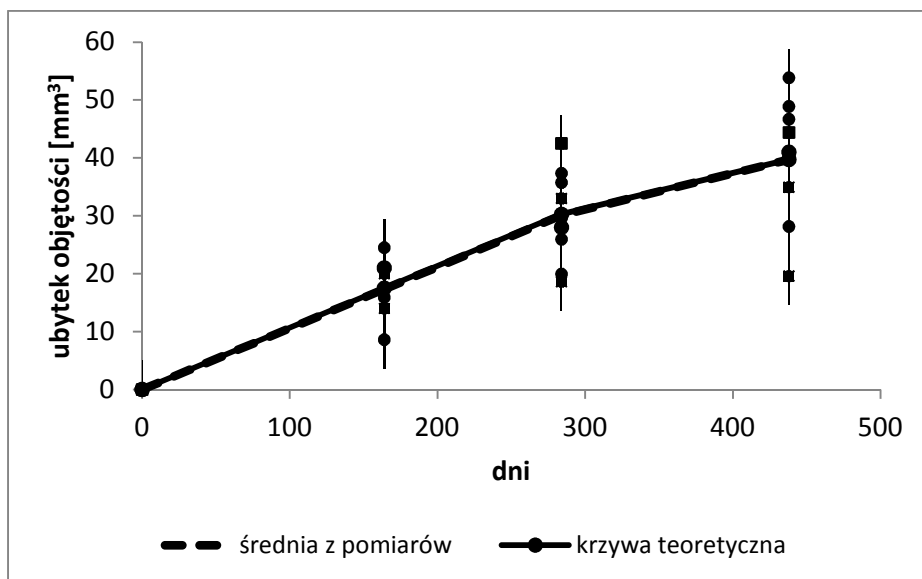
- badań odciskowych, pozwalających na określenie ubytków objętości materiału łopatek oraz odtworzenie profilu powierzchni i krawędzi łopatek,
- wykonania dokumentacji fotograficznej zmian w wytypowanych obszarach łopatek.

Geometria powierzchni została odwzorowana przy użyciu dobrze wypełniającej, elastycznej pasty (KDD KONDISIL V-3), która odznacza się niską konsystencją, niską adhezją, co ułatwia oddzielenie wypełnienia od powierzchni i krótkim czasem wiązania, a ponadto jest odporna na czynniki zewnętrzne i nie ulega autodestrukcji. Lokalne ubytki objętości tworzywa łopatek określono dwojako: (1) przy wykorzystaniu przestrzennego skanera 3D VI-9i (Konica-Minolta) z obiektywem o ogniskowej $f=25$ mm i specjalistycznego oprogramowania "RapidForm Verifier"; (2) poprzez pomiary objętości ubytków w odciskach gipsowych.

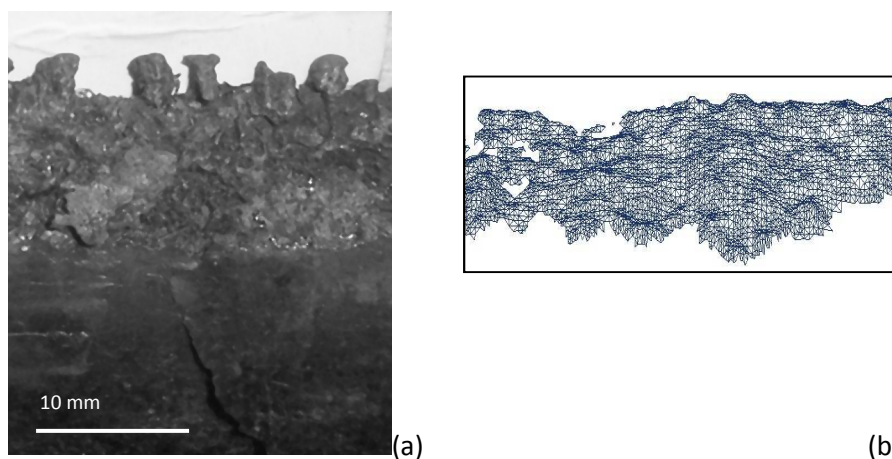
Błąd pomiarowy oceniono, jako bardzo poważny (zaznaczony na rysunkach). Błąd wynika z: (1) niedokładności odwzorowania ubytków, (2) niedokładności określenia objętości ubytków poprzez ich wypełnianie, (3) trudności w wyborze właściwej płaszczyzny odniesienia dla skanera w związku z zaokrągleniem łopatki.

2.3. Wyniki badań

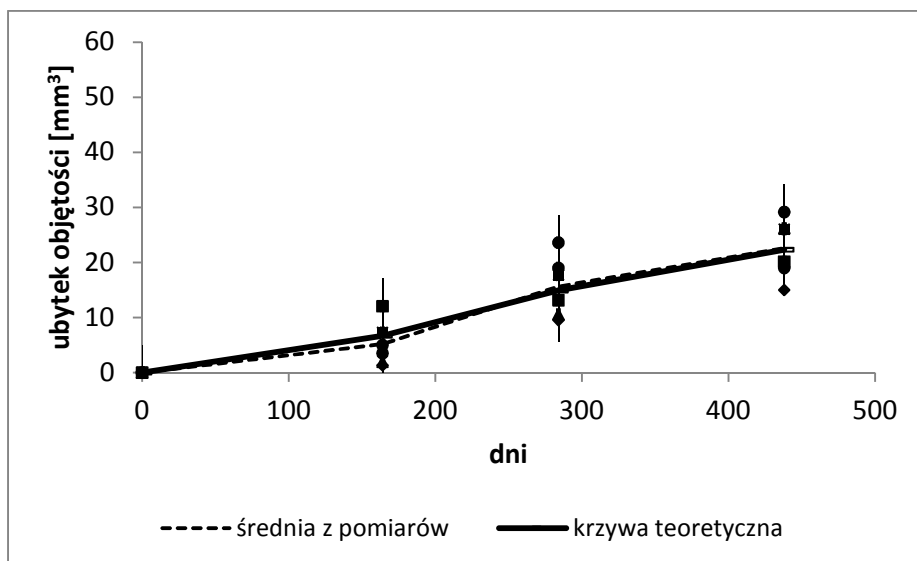
Wyniki badań przedstawiono na Rys. 2-5: krzywe erozyjne na Rys. 2,4 , a przykładowe obrazy oraz geometryczne odwzorowania zniszczonych fragmentów powierzchni łopatek na Rys. 3,5.



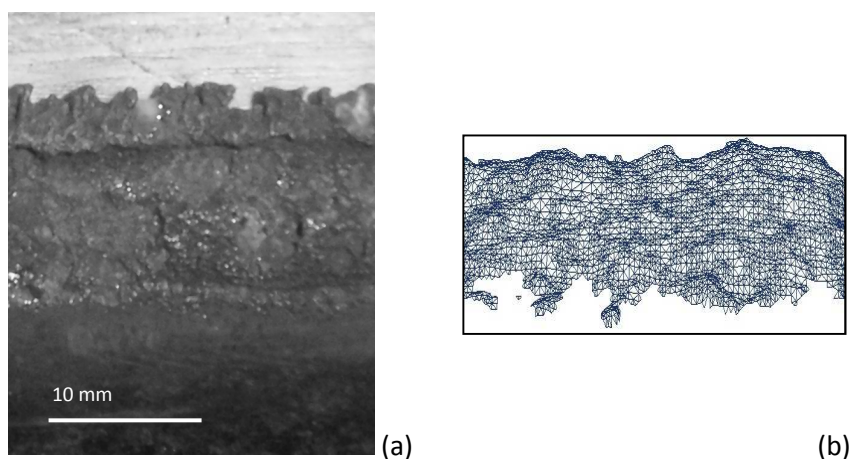
Rys. 2. Zarejestrowane podczas przeglądów kontrolnych ubytki objętości na powierzchni 1 cm^2 łopatek regenerowanych materiałem SP-1 oraz krzywa erozyjna, wyznaczona na podstawie obliczeń modelowych. Punkty doświadczalne odpowiadają różnym łopatom i lokalizacjom miejsc pomiaru.



Rys. 3. Obraz krawędzi i powierzchni bocznej w środkowej strefie łopatki 22, wykonanej z materiału SP1 (oznaczenie łopatki robocze) po 464 dniach eksploatacji (a) oraz przestrzenny obraz morfologii powierzchni, zarejestrowany przy pomocy skanera 3D (b).



Rys. 4. Zarejestrowane podczas przeglądów kontrolnych ubytki objętości na powierzchni 1 cm^2 łopatek regenerowanych materiałem EB-150 oraz krzywa erozyjna, wyznaczona na podstawie obliczeń modelowych. Punkty doświadczalne odpowiadają różnym łopatom i lokalizacjom miejsc pomiaru.



Rys. 5. Obraz krawędzi i powierzchni bocznej w środkowej strefie łopatki 23, wykonanej z materiału SP1 (oznaczenie łopatki robocze) po 464 dniach eksploatacji (a) oraz przestrzenny obraz morfologii powierzchni, zarejestrowany przy pomocy skanera 3D (b).

3. Kwantyfikacja procesu za pomocą opisu modelowego. System prognostyczny

3.1. Założenia i zapis modelu

Jako podstawę systemu kwantyfikacji procesu wybrano matematyczny model oceny efektywności procesów ubytkowych, zachodzących pod wpływem impulsów kawitacyjnych, przedstawiony w pracy [11]. Model oparty został na następujących założeniach: (1) Ubytki masy są funkcją różnicy pomiędzy szybkością dostarczania energii do warstwy powierzchniowej i szybkością zużywania energii w procesach hamujących, w zgodzie z właściwymi prawdopodobieństwami ich występowania; (2) W procesie

dezintegracji obszaru obciążanego dochodzi do powstawania mikropęknięć, ich łączenia i propagacji, aż do zaistnienia pęknięcia krytycznego. Średnia szybkość generacji mikropęknięć jest funkcją wartości i rozkładu obciążeń oraz właściwości wytrzymałościowych materiału; (3) Typ rozkładów gęstości prawdopodobieństwa poszczególnych podprocesów jest znany, a ich specyfikacja poprzez parametry rozkładów jest osiągnięta w procedurach fenomenologicznych. Stąd, na postać rozkładów wpływają m.in. morfologia i niektóre uwarunkowania fizyczne; (4) Parametry równań modelowych: parametry związane z obciążeniem, parametry rozkładów statystycznych w jądrach równań różniczkowo-całkowych oraz współczynniki partycji, związane z udziałem poszczególnych procesów w procesie erozji pozostają w związkach funkcyjnych z wartościami parametrów materiałowych i wytrzymałościowych niszczonego ciała; (5) Model odnosi się do obciążenia jednostkowej powierzchni ciała, zatem efektywność procesu w obszarze rzeczywistym uzyskiwana jest poprzez skalowanie.

Równania modelowe (1) są zapisem, w probabilistycznym ujęciu, transferu energii do materiału według różnych mechanizmów, konstytuujących różne procesy składowe [11]:

$$\begin{aligned}
 \sigma(t) &= \lambda_0 g(t) + \int_0^t \lambda_1 f_1(t-\tau) \sigma(\tau) d\tau + \int_0^t \lambda_2 h(t-\tau) \frac{dx}{d\tau}(\tau) d\tau + \int_0^t \lambda_3 h_1(\tau) \sigma(\tau) d\tau \\
 \frac{dx(t)}{dt} &= Ax(t) + \int_0^t \lambda_1 f_1(t-\tau) \sigma(\tau) d\tau \\
 \sigma_1(t) &= \sigma(t) - \int_0^t \lambda_4 g_1(t-\tau) g(\tau) d\tau
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Oznaczenia:

σ – ilość energii absorbowanej pod jednostkową powierzchnią materiału w jednostce czasu pod działaniem kawitacji o jednostkowym natężeniu; x – ilość energii uwolnionej przy tworzeniu mikropęknięć pod jednostkową powierzchnią pod działaniem kawitacji o jednostkowym natężeniu;

g – szybkość absorpcji energii w procesach odkształcania plastycznego pod jednostkową powierzchnią pod działaniem kawitacji o jednostkowym natężeniu; f_1, h, h_1, g_1 – gęstości prawdopodobieństwa zużycia dostarczonej energii w procesach tworzenia mikropęknięć, łączenia mikropęknięć, generacji pęknięć na powierzchni oraz przy zamykaniu mikropęknięć;

λ_i – współczynniki wyrażające rozkład podziału energii w procesach składowych;

σ_1 - ilość energii zużytej w procesach niszczenia pod jednostkową powierzchnią materiału w jednostce czasu pod działaniem kawitacji o jednostkowym natężeniu.

Model ma charakter kinetyczny, a poprzez parametry obliczeniowe, związane in spe z właściwościami materiałowymi i warunkami niszczenia – fenomenologiczny. W warunkach ustalonych są to procesy stochastyczne, ze względu na niezmienny rozkład przestrzenny i czasowy obciążeń. Przyjęcie a priori, postaci funkcji rozkładu poszczególnych składowych

umożliwia deterministyczne sformułowanie problemu. Opis matematyczny stanowi układ równań całkowo-różniczowych Voltery drugiego rodzaju z odpowiednimi warunkami.

Z fizycznego punktu widzenia, cechy procesu podstawowe dla jego kwantyfikacji obejmują: (1) losowość aktów ekstrakcji fragmentów materiału, wynikającą z losowości obciążeń oraz stanu i budowy mikrostrukturalnej ciała, przy czym statystyka obciążeń w odniesieniu do siły, obszaru oddziaływania, kierunku itp. jest określona stosownymi funkcjami prawdopodobieństwa, zależnymi od uwarunkowań procesowych (środowiskowych, trybu pracy itp.); (2) zmęczeniową naturę procesu. Związek postępów erozji kawitacyjnej z wytrzymałością zmęczeniową materiału został potwierdzony w bezpośrednich badaniach lub pośrednio, m.in. w pracach [1,3,14,17,25,26]. Pod tym założeniem można interpretować destrukcję materiału, jako rezultat stopniowej kumulacji energii, wydzielającej się lokalnie w porcjach określonych histerezą cyklu naprężenie-odkształcenie lub objętościowo, wskutek trwałych odkształceń plastycznych znacznych fragmentów niszczonego ciała; (3) integralny, objętościowy charakter procesu erozji, wynikający ze sprężystej dyssypacji energii w tworzywach elasto-plastycznych - sekwencyjne i skorelowane następstwo akumulacji energii: obniżanie bariery wytrzymałości aż do osiągnięcia wartości krytycznej i pęknięcia; (4) umocnienie warstwy obciążanej wskutek przyrostu liczby dyslokacji w początkowej fazie niszczenia oraz spowolnienie tempa procesu ubytkowego wskutek zamykania pęknięć (uplastycznienie krawędzi szczeliny) w zaawansowanym stadium erozji, analizowane np. w pracach [8,29]. Ze zmęczeniowym i objętościowym charakterem procesu wiąże się istnienie progowej wartości obciążenia dla pęknięcia [19,23] oraz progowa wartość zaabsorbowanej lokalnie energii [28].

3.2. Logika systemu prognostycznego

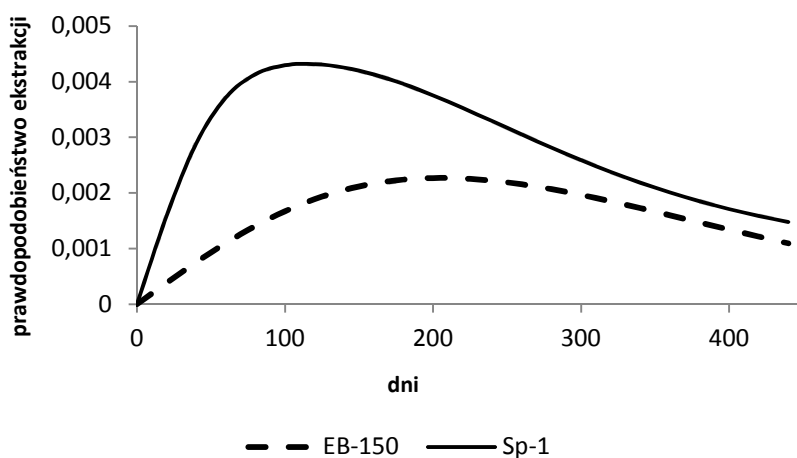
Wykorzystanie modelu (1) do przewidywania intensywności procesów erozyjnych jest uwarunkowane znajomością wartości parametrów równań modelowych. System prognostyczny powstaje w wyniku uzupełnienia numerycznej implementacji modelu bazą związków funkcyjnych, uzależniających wartości parametrów równań od wartości parametrów wytrzymałościowych niszczonego ciała oraz obciążeń. W przypadkach aplikacji, odnoszących się do ściśle określonych, środowiskowych warunków niszczenia możliwe jest ustalenie zależności funkcyjnych pomiędzy wartościami parametrów wejściowych (parametrów równań modelowych) a wartościami parametrów wytrzymałościowych niszczonych materiałów - poprzez aproksymację eksperymentalnych krzywych kumulacyjnych. Działanie to obejmuje rodzinę krzywych erozji, wyznaczonych dla szerokiego spektrum materiałów. W rezultacie powstaje symulator procesów ubytkowych. Zakresy wartości zmiennych niezależnych (czas) i zależnych (ubytki lub szybkość procesu) oraz odpowiadające zakresy zmienności ubytków, ustalane są w systemie poprzez narzucenie zgodności z wzorcowymi krzywymi eksperymentalnymi. Także miary wielkości wejściowych oraz miary wielkości wyjściowych wynikają z obserwacji i zależności pomiarowych, np. obciążenie jest zadane w [Pa] lub [N], w zależności od sposobu pomiaru, natomiast wielkości wynikowe ustalane w jednostkach: [mm^3/s] i [mm^3]. Zasadniczą przeszkodą rozwoju systemu jest brak niezbędnych danych eksperymentalnych - krzywych erozji różnych materiałów, niszczonych w wyniku działania znanych obciążeń kawitacyjnych. Dotychczas zrealizowano analogiczny system, odnoszący się do niszczenia materiałów w warunkach działania cząstek stałych. Jego aplikacja zostanie udostępniona na stronie portalu PI-Grid Plus.

Niniejsza praca stanowi element prac weryfikacyjnych poprawności symulacji przebiegu procesu i służy opracowaniu systemu prognostycznego dla erozji kawitacyjnej. Testowana jest implementacja numeryczna modelu [11], u podstaw której leży

upraszczając stwierdzenie (T), że wartości parametrów obliczeniowych zależą tylko od materiału i nie są zależne od obciążenia a uśrednione obciążenie występuje jako parametr skalujący. Potwierdzenie tezy T jest warunkiem ustanowienia uniwersalnego zestawu zależności funkcyjnych pomiędzy wartościami parametrów obliczeniowych i wytrzymałościowych i w konsekwencji systemu prognostycznego do przewidywania procesu niszczenia dowolnych materiałów w dowolnych warunkach obciążeń.

3.3. Testowanie systemu prognostycznego

Wyznaczono wartości parametrów obliczeniowych w wyniku dopasowania krzywych obliczeniowych do uśrednionych doświadczalnych krzywych erozyjnych (Rys. 2, 4). Założono, że danemu rodzajowi materiału odpowiada jeden zestaw parametrów obliczeniowych: łopatom regenerowanym elektrodami SP-1 i EB-150 odpowiadają inne zestawy parametrów. Wobec niewielkich zmian obciążenia kawitacyjnego wzdłuż łopatki przyjęto założenie o jego jednorodności. Prawdopodobieństwa usunięcia z warstwy wierzchniej ciała losowo wybranego elementu o objętości 1 mm^3 w ciągu 10 dni przedstawione zostały w funkcji czasu na Rys. 6. Zależności odnoszą się do obciążenia kawitacyjnego, stanowiącego $2/13$ obciążenia rzeczywistego, (występującego w warunkach pracy badanej turbiny). Określenie obciążenia w jednostkach bezwzględnych możliwe jest jedynie poprzez uzyskanie podobnej krzywej dla tego samego materiału w znanych warunkach obciążeń: np. określenie MDP (Mean Depth of Penetration) dla podobnego materiału, niszczonego przy znanym obciążeniu i poprzez porównanie - wyznaczenie wartości bezwzględnej obciążenia.



Rys. 6. Prawdopodobieństwo ekstrakcji losowo wybranego fragmentu materiału o objętości 1 mm^3 w czasie 10 dni w warunkach obciążenia kawitacyjnego, stanowiącego $2/13$ obciążenia rzeczywistego (dotyczy Rys. 2 i 4).

Wyliczone wartości prawdopodobieństw są funkcją wartości parametrów równań modelowych, które zależą od właściwości wytrzymałościowych niszczonego materiału. Odpowiednie zależności funkcyjne dla przypadku erozji wywołanej działaniem cząstek stałych przedstawiono w pracy [15]. Zmiana wartości parametrów wytrzymałościowych implikuje zmianę przypisanych im parametrów równań modelowych, co powoduje odpowiednią zmianę prawdopodobieństwa ekstrakcji elementu objętościowego niszczonego ciała.

W Tabelach 1 i 2 przedstawiono, o ile procent zmieni się prawdopodobieństwo ekstrakcji elementu objętościowego stopu, jeżeli zmiana wartości jednego z wejściowych parametrów obliczeniowych wyniesie 20%. Do analizy wybrano parametry równań modelowych o przewidywalnym związku z ilością energii doprowadzonej w próbie zerwania, wytrzymałością zmęczeniową oraz umocnieniem: λ_0 , proporcjonalny do różnicy pomiędzy energią doprowadzoną w próbie zerwania materiału wzorcowego i testowanego; λ_3 , proporcjonalny do różnicy pomiędzy wytrzymałością zmęczeniową wzorcowego i testowanego materiału; λ_4 , proporcjonalny do osiąganego poziomu umocnienia materiału pod wzorcowym obciążeniem kawitacyjnym. Inne parametry, których zmiany poddano analizie, to: (a) v_1 , - odchylenie standardowe w rozkładzie normalnym g , proporcjonalne do iloczynu wytrzymałości zmęczeniowej i twardości materiału; (b) v_2 - parametr miejsca w rozkładzie g_I (rozkład Rice'a), proporcjonalny do iloczynu wytrzymałości zmęczeniowej wytrzymałości na rozciąganie i granicy plastyczności materiału.

TABELA 1. Procentowa zmiana prawdopodobieństwa ekstrakcji elementu z łopatki SP-1 przy 20% zmianie wartości jednego z wejściowych parametrów obliczeniowych, uzyskanych przy dopasowaniu krzywej obliczeniowej do punktów doświadczalnych.

	$0,8\lambda_0$	$1,2\lambda_0$	$0,8\lambda_3$	$1,2\lambda_3$	$0,8\lambda_4$	$0,8v_1$	$1,2v_1$	$0,8v_2$	$1,2v_2$
po 164 dniach	spadek o 20%	wzrost o 20%	spadek o 9,5%	wzrost o 10,7%	wzrost o 6,9%	spadek o 1%	wzrost o 0,7%	spadek o 13%	wzrost o 8,7%
po 284 dniach	spadek o 20%	wzrost o 20%	spadek o 17,3%	wzrost o 21,6%	wzrost o 26,1%	spadek o 2,5%	wzrost o 2,5%	spadek o 25,1%	wzrost o 22,9%
po 438 dniach	spadek o 20%	wzrost o 20%	spadek o 26%	wzrost o 37%	wzrost o 73,6%	spadek o 2,2%	wzrost o 2,3%	spadek o 21,5%	wzrost o 29,1%

TABELA 2. Procentowa zmiana prawdopodobieństwa ekstrakcji elementu z łopatki EB-150 przy 20% zmianie wartości jednego z wejściowych parametrów obliczeniowych, uzyskanych przy dopasowaniu krzywej obliczeniowej do punktów doświadczalnych.

	$0,8\lambda_0$	$1,2\lambda_0$	$0,8\lambda_3$	$1,2\lambda_3$	$0,8\lambda_4$	$0,8v_1$	$1,2v_1$	$0,8v_2$	$1,2v_2$
po 164 dniach	spadek o 20%	wzrost o 20%	spadek o 0,1%	wzrost o 0,1%	wzrost o 2,3%	wzrost o 9,2%	spadek o 9,6%	spadek o 5,7%	wzrost o 3,2%
po 284 dniach	spadek o 20%	wzrost o 20%	spadek o 0,8%	wzrost o 0,8%	wzrost o 9%	spadek o 3%	spadek o 0,1%	spadek o 17%	wzrost o 11,4%
po 438 dniach	spadek o 20%	wzrost o 20%	spadek o 2%	wzrost o 2%	wzrost o 36,2%	spadek o 11,4%	wzrost o 10,7%	spadek o 37,9%	wzrost o 33,8%

Specyfikacja wejściowych i wyjściowych wielkości obliczeniowych w procedurze wyznaczania krzywych erozji obejmowała:

(1) wprowadzenie danych wejściowych - obciążenia, zestawu parametrów równań modelowych: współczynników partycypacji procesów składowych i bezwymiarowych parametrów rozkładów statystycznych procesów składowych, pola obciążanej powierzchni i czasu ekspozycji materiału na działanie obciążenia oraz

(2) dane wynikowe: krzywe niszczenia (ubytki objętości ciała w czasie) oraz krzywe szybkości niszczenia (zależność szybkości zmian objętości ciała od czasu) i opcjonalnie funkcje prawdopodobieństwa zachodzenia procesu ubytkowego i podprocesów.

Jednostki wprowadzanych wielkości były implikowane przez odniesienie do krzywych pomiarowych. Operacje obliczeniowe związane z wyznaczaniem efektywności procesu zużycia, wykonywane były przy pomocy własnego programu numerycznego PCE [13], który generował następujące Do symulacji procesu niszczenia wybrano osiem

parametrów równań modelowych (parametrów obliczeniowych): współczynniki partycji podprocesów absorpcji energii w procesie odkształcania plastycznego, pęknięcia i w procesach hamujących oraz parametry stosownych rozkładów, a ponadto parametr kwantyfikujący obciążenia.

4. Dyskusja

4.1. Analiza wyników obserwacji

W warunkach eksploatacyjnych proces erozji kawitacyjnej w turbinie Banki-Michela zachodzi zarówno na powierzchniach zewnętrznych łopatek, jak i wzdłuż całej krawędzi natarcia, przy czym proces niszczenia jest nieznacznie niejednorodny: zaobserwowano większą intensywność niszczenia krawędzi łopatki w pobliżu jej lewego krańca (zamocowania) i jednocześnie większą intensywność niszczenia powierzchni bocznej w pobliżu prawego krańca łopatki. Dominującym podprocesem w każdym z badanych obszarów jest kruche pęknięcie od powierzchni łopatki. Okazało się, że śledzenie procesu ubytkowego w strefie krawędziowej jest niemożliwe, ponieważ ekstrakcja następuje w sposób, który powoduje ścinanie krawędzi natarcia: obniżanie się linii brzegowej na całej długości łopatki, wskutek czego metoda odciskowa w badaniu zmian ubytkowych po długich okresach eksploatacji nie ma zastosowania. Typowy przebieg procesu ubytkowego na powierzchni bocznej łopatki charakteryzuje się pojawieniem się po okresie inkubacji przyspieszonej erozji, której szybkość w kolejnym etapie spada i się stabilizuje (w przypadku łopatek regenerowanych materiałem SP-1 występowanie okresu inkubacji jest domyślne*). Stwierdzono bardzo duży rozrzut wyników pomiarów: (a) wykonanych w tych samych obszarach różnych łopatek z tego samego materiału i (b) wykonanych w sąsiednich obszarach tej samej łopatki. Źródłem błędów mogą być: (1) niedokładne wypełnienie ubytków i ich odwzorowanie. Z przeprowadzonych doświadczeń wynika, że metoda wypełniania przestaje mieć zastosowanie, gdy objętości lokalnych ubytków są mniejsze niż $0,2 \text{ mm}^3$; (2) losowość procesu. Jedynym sposobem zmniejszenia błędu statystycznego jest zatem zwiększenie liczby testowanych łopatek.

(*) Przyjęto błędne założenie o niskim tempie niszczenia regenerowanych łopatek w początkowym okresie eksploatacji, w związku z czym pierwszy przegląd stanu ich zużycia wykonano po 164 dniach od chwili uruchomienia turbiny. Ujawniono wysokie ubytki erozyjne, co przekreśliło możliwość oszacowania szybkości niszczenia w okresie inkubacyjnym (o ile taka faza niszczenia mogła być wyróżniona w przypadku nieodpuszczonych, regenerowanych łopatek).

4.2. Dyskusja założeń i niepewności

Ważnym problemem w formułowaniu zagadnienia jest to, w jakim stopniu proces zużycia zależy od charakterystyki obciążeń – czy posługiwanie się uśrednioną wartością obciążenia prowadzi do miarodajnych wyników obliczeń erozyjnych ubytków masy. Rozstrzygnięcie tej kwestii rodzi bowiem takie implikacje, jak możliwość radykalnego uproszczenia obliczeń symulacyjnych i możliwość skalowania. Ze względu na fenomenologiczny charakter modelu parametr kwantyfikujący obciążenia może być zdefiniowany np. w oparciu o rejestrowany rozkład obciążeń. W niniejszej pracy potraktowano parametr kwantyfikujący obciążenia, zgodnie z tezą T jako parametr skalujący. Skuteczna aproksymacja punktów doświadczalnych krzywymi obliczeniowymi, odzwierciedlona na Rysunkach 2 i 4 wspiera pogląd, że kawitacyjne obciążenie łopatek w turbinie Banki-Michela może być z akceptowalną dokładnością traktowane jak element skalujący w opisie procesu, a charakterystyka niszczenia zależy tylko od właściwości

tworzywa, z którego wykonane są łopatk. Potwierdzenie tezy (T) generuje korzyści bezpośrednio wykorzystania systemu prognostycznego in spe:

(1) użytkownik systemu nie musi odwoływać się do bieżących doświadczeń – musi jedynie znać warunki obciążeń kawitacyjnych, w których przebiega proces niszczenia oraz właściwości materiałowe tworzywa łopatek;

(2) konsekwencją założenia o niezależności parametrów obliczeniowych od obciążenia jest możliwość skalowania krzywych erozji względem wartości obciążeń.

Z analizy rezultatów przedstawionych w Tabelach 1 i 2 wynika, że w zadanych warunkach niszczenia efektywność erozji: (1) zmniejsza się proporcjonalnie do wzrostu ilości energii niezbędnej do zerwania próbki w próbie rozciągania, (2) zależy od wytrzymałości zmęczeniowej materiału – znacznie bardziej w przypadku materiału mniej wytrzymałego (SP-1) - przy czym jej wpływ zwiększa się w czasie, (3) zależy istotnie od skłonności materiału do umocnienia: niższy osiągalny poziom umocnienia materiału implikuje znaczący wzrost prawdopodobieństwa ekstrakcji elementu objętościowego ciała, tym większy, im bardziej zaawansowany jest proces niszczenia, (4) zależy od szybkości umacniania, przy czym wzrost szybkości (zmniejszenie różnicy szybkości umacniania materiału wzorcowego i testowanego) powoduje zmniejszenie efektywności erozji. Zmniejszenie wydajności procesu jest większe w zaawansowanym stadium erozji. Ustalone kierunki zmian efektywności niszczenia (wzrost/spadek) są zgodne z przewidywaniami i świadczą o poprawności zastosowanej koncepcji kwantyfikacji procesu i budowy stosownego systemu prognostycznego. Rezultaty dla parametru v_1 pokazują, że wpływ szybkości absorbowania energii w próbie rozciągania na proces kawitacyjnego niszczenia ciała jest niewielki i niejednoznaczny – w przypadku materiału EB-150 wzrost wartości tego parametru powoduje obniżenie efektywności erozji we wczesnym stadium niszczenia (164 dni) i podwyższenie efektywności erozji w zaawansowanym stadium niszczenia (438 dni).

Źródła błędów w przewidywaniu efektywności procesu erozyjnego niszczenia materiału za pomocą zaproponowanego systemu są natury:

- fizycznej: niepewność związana jest tutaj m.in. z losowością procesu i znacznym rozrzutem uzyskiwanych rezultatów. Niepewność może zostać zredukowana poprzez wykorzystanie większej liczby krzywych erozyjnych;
- modelowej i wynikają z przyjętych założeń i uproszczeń, np. z wyboru rozkładów statystycznych. Z fizycznego modelu erozji [12] wynika, że procesy składowe procesu niszczenia są wzajemnie zależne, zatem parametry obliczeniowe /parametry równań modelowych/ są ze sobą także powiązane. Wzajemne uzależnienie parametrów obliczeniowych odzwierciedla sekwencję wydarzeń (podprocesów) zachodzących w procesie niszczenia, która nie znajduje odzwierciedlenia w wykorzystywanym modelu matematycznym. Nie bierze się w nim także pod uwagę np. zmiany tłumienia rozwoju pęknięć czy zmiany morfologii powierzchni w trakcie procesu niszczenia, które wprowadzają dodatkowe rodzaje nieliniowości.
- obliczeniowej, np. błąd, związany z niejednoznacznością wyznaczania parametrów obliczeniowych w wyniku aproksymacji krzywych eksperymentalnych.

4.3. Stopień uwiarygodnienia.

Poprawność założeń, jednoznaczność wyznaczenia wartości parametrów, efektywność procedur obliczeniowych oraz wykonalność obliczeniowa powinny być przedmiotem dalszych analiz, opartych na obliczeniach, odnoszących się do rzeczywistych, mierzalnych procesów ubytkowych. Ponadto, należy dążyć do weryfikacji poprawności uzyskiwanych wyników poprzez dokładne pomiary impulsów kawitacyjnych na wybranych

stanowiskach badawczych oraz wyznaczenie krzywych erozyjnych materiałów zróżnicowanych pod względem właściwości wytrzymałościowych i budowy. Doprowadzi to do skompletowania systemu, zwłaszcza po wyznaczeniu związków funkcyjnych między parametrami obliczeniowymi i materiałowymi.

5. Uwagi, wnioski i wskazania

1. Ze względu na występowanie silnych obciążeń kawitacyjnych w turbinie Banki-Michela i brak możliwości ich wyeliminowania w zasadniczym obszarze warunków pracy maszyny, niezbędnym staje się wytworzenie narzędzia przewidywania efektywności procesu niszczenia. Do budowy odpowiedniego systemu prognostycznego może być wykorzystany symulator, oparty na modelu matematycznym przedstawionym w pracy [12].
2. Analiza uzyskanych na drodze obliczeniowej prawdopodobieństw niszczenia wskazuje, że łopatki turbiny Banki-Michela należy wykonywać z materiału, który charakteryzuje się wysokim poziomem energii niezbędnej do zerwania próbki w próbie rozciągania, a w przypadku silnych obciążeń lub długotrwałej pracy maszyny wysoką wytrzymałością zmęczeniową i zdolnością do umocnienia pod wpływem obciążeń mechanicznych.
3. Dokonane dopasowanie krzywych obliczeniowych do punktów eksperymentalnych świadczy o tym, że ewentualna zależność parametrów równań modelowych od obciążenia jest niewielka. Stanowi to przesłankę, że przyjęty sposób opisu pozostaje skuteczny także przy założeniu, że o kształcie krzywej erozyjnej decyduje stały dla danego materiału zestaw parametrów obliczeniowych, a intensywność kawitacji uwzględniana jest w procedurze przewidywania jako mnożnik.
4. Wobec losowej natury procesu redukcja niepewności i np. bardziej precyzyjne wyznaczenie niezbędnych w systemie zależności funkcyjnych pomiędzy parametrami równań modelowych a parametrami wytrzymałościowymi materiału, z którego wykonane są łopatki osiągalna jest tylko poprzez zwielokrotnienie liczby prób badawczych.

Podziękowania:

Praca została wykonana w ramach projektu badawczego NCN: N N504 3578 37

Literatura

1. Ahmed S M, Hokkirigawa K, Ito Y, Oba R. Scanning electron microscopy observation on the incubation period of vibratory cavitation erosion. *Wear* 1991; 142: 303-314.
2. Antonini A, Giadrossi A Turbine behavior under cavitation conditions. *Int. Water Power & Dam Construction* 1981; 33(3): 25-28.
3. Bedkowski W, Gasiak G, Lachowicz C, Lichtarowicz A, Lagoda T, Macha E. Relations between cavitation erosion resistance of materials and their fatigue strength under random loading. *Wear* 1999; 230: 201-209.
4. Bellet L et al. Cavitation erosion prediction on Francis turbines. *Int. Journal on Hydropower and Dams* 1997; 4(3): 56-58.
5. Berchiche N, Franc J-P, Michel J-M, A Cavitation Erosion Model for Ductile materials, *Transactions of ASME: Journal of Fluids Engineering* 2002; 124: 601-606.
6. Dular M, Stoffel B, Sirok B. Development of a Cavitation Erosion Model. *Wear* 2006; 261: 642-655.
7. Dupont Ph et al. Cavitation erosion prediction on Francis turbines, Pt.2: Model Tests and Flow Analysis. *Proc. 18th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Cavitation 1996; Valencia, Vol.1: 574-583.*
8. Elber W. Fatigue crack closure under cyclic tension. *Engineering Fracture Mechanics* 1970; 2: 37-45.

9. Fortes-Patella R, Reboud J L. The new approach to evaluate the cavitation erosion power, *Journal of Fluid Engineering – Transactions of ASME* 1998; 120: 335-344.
10. Gałka E. Cechy konstrukcyjno-funkcjonalne turbin wodnych Banki-Michella niskospadowych i średnospadowych. Informator Centralnego Programu Badawczo-Rozwojowego p.n. Kompleksowy rozwój energetyki. Gdańsk: Instytut Maszyn Przepływowych PAN, 1990.
11. Gireń B G, Steller J. Random multistage input and energy partition approach to the description of cavitation erosion process. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 2009; 23: 263-273.
12. Gireń B G. Stochastic model of cavitation erosion of low plasticity metallic materials. *Prace Instytutu Maszyn Przepływowych – Transactions of the Institute of Fluid Flow Machinery* 2006; 117: 1-19.
13. Gireń B G, Frączak J. Złożone procesy zużycia – analiza ilościowa. *Zeszyty Naukowe Instytutu Maszyn Przepływowych PAN, Gdańsk* 2009; 52/1511.
14. Gireń B G. A single-parameter predictor of the effectiveness of cavitation erosion process. *Scientific Problems of Machines Operation and Maintenance* 2011; 46(4): 7-23.
15. Gireń B G, Krella A. Prediction of abrasion performance of metal alloys. *Inżynieria Materiałowa* 2013; 1(191): 25-30.
16. Hammit F G, De M K. Cavitation Damage Prediction. *Wear* 1979; 52: 243-262.
17. Hattori S, Nakao E. Cavitation Erosion Mechanisms and Quantitative Evaluation Based on Erosion Particles. *Wear* 2002; 249: 839-845.
18. Heymann F J. On the Time Dependence of the Rate of Erosion Due to Impingement or Cavitation. *Erosion by Cavitation or Impingement, ASTM Special Technical Pub.* 1967; 408: 70-110.
19. Iwai Y., Okada T., Tanaka S. A Study of Cavitation Bubble Collapse Pressures and Erosion, pt.2: Estimation of Erosion from the Distribution of Bubble Collapse Pressures. *Wear* 1989, 133: 233-243.
20. Kaniecki M. Turbina Banki-Michella. *Miedzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna nt.: Hydrauliczne maszyny wirnikowe w energetyce wodnej i innych działach gospodarki HYDROFORUM'2000; Czorsztyn, Poland; Wydawnictwo IMP PAN, 2000.*
21. Karimi A, Leo W R. Phenomenological Model for Cavitation Erosion Rate Computation. *Materials Science and Engineering* 1987; 95: 1-14.
22. Lecoffre Y. Cavitation Erosion, Hydrodynamics Scaling Laws - Practical Method of Long Term Damage Prediction. *Proceedings of. Int. Symposium on Cavitation CAV'95, Deauville, France* 1995; 249-256.
23. Pereira F, Avellan F, Dupont P. Prediction of cavitation erosion – an energy approach. *Journal of Fluid Engineering - Transactions of ASME* 1998; 120: 719-727.
24. Reymann Z. Turbiny Banki-Michella konstrukcji IMP PAN. Doświadczenia z badań modeli i prototypów. *Zeszyty Naukowe Instytutu Maszyn Przepływowych PAN, Gdańsk* 1993: 400/1363.
25. Richman R H, McNaughton W P. Correlation of cavitation erosion behaviour with mechanical properties of metals. *Wear* 1990; 140: 63-82.
26. Richman R H, McNaughton W P. A Metallurgical Approach to Improved Cavitation-Erosion Resistance. *Journal of Materials Engineering and Performance* 1997; 6: 633-641.
27. Sitnik L. Mathematical description of the cavitation erosion process and its utilization for increasing the material resistance to cavitation. *Proc. 2nd Joint ASCE/ASME Mechanics Conf. on Cavitation in Hydraulic Structures and Turbo Machinery, Albuquerque, New Mexico* 1985; 21-30, ASME bound vol. G00297.
28. Soyama H, Kumano H, Saka M. A New Parameter to Predict Cavitation Erosion. *Fourth International Symposium on Cavitation; Pasadena, USA; California Institute of Technology, 2001.*
29. Stewart A T. The influence of environment and stress ratio on fatigue crack growth at near threshold stress intensities in low alloy steel. *Engineering Fracture Mechanics* 1980; 13: 463-478.

30. Stinebring D R, Holl J W, Arndt R E A. Two Aspects of Cavitation Damage in the Incubation Zone: Scaling By Energy Considerations and Leading Edge Damage. *Journal of Fluid Engineering* 1980; 102: 481-485.
31. Veerabhadra R P, Buckley D H, Matsumura M. A unified relation for cavitation erosion. *Int. Journal of Mechanical Sciences* 1984; 26: 325-335.

Bolesław G. Gireń,

Instytut Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego Polskiej Akademii Nauk w Gdańsku

ul. Fiszera 14, 80-231 Gdańsk, Polska

E-mail: giren@imp.gda.pl

mgr Marzena Noińska-Macińska,

Instytut Informatyki i Mechatroniki,

Wyższa Szkoła Gospodarki w Bydgoszczy

ul. Garbary 2, 85-229 Bydgoszcz, Polska
