

**Andrzej Adamkiewicz, Aleksander Valishin**

Katedra Diagnostyki i Remontów Maszyn

Wydział Mechaniczny

Akademia Morska w Szczecinie

ul. Podgórna 52/53, 70-205 Szczecin

e-mail: [a.adamkiewicz@am.szczecin.pl](mailto:a.adamkiewicz@am.szczecin.pl), [a.valishin@am.szczecin.pl](mailto:a.valishin@am.szczecin.pl)

## **Opracowanie i badania własności dodatku do wody chłodzącej zapobiegającego zużyciu erozyjnemu powierzchni chłodzonych okrętowych silników spalinowych**

**Słowa kluczowe:** *zużycie erozyjne, układ chłodzenia, okrętowy silnik spalinowy, korozja, nikirowanie chemiczne, modele regresyjne*

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki badań własności opracowanego dodatku do cieczy chłodzącej okrętowego silnika spalinowego. Działanie ochronne cieczy oparto na nikirowaniu chemicznym – na bezprądowym tworzeniu warstw niklowych na chłodzonych powierzchniach. Opisano stanowisko badawcze oraz program eksperymentu. Do opracowania wyników przeprowadzonego eksperymentu zastosowano metody statystyczne. Otrzymano zależności regresyjne ubytku masy badanych próbek od warunków i programu eksperymentu. Ubytek masy próbek opisano w funkcji stężenia dodatku, strumienia objętości i temperatury cieczy chłodzącej, podawanej przez pompę. Pokazano wysoką skuteczność badanego dodatku w porównaniu ze stosowanymi do tego celu dodatkami EKSTROL i NALCOOL-2000 na przykładzie wyników badań weryfikacyjnych. Opisano walidację wyników przeprowadzoną na rzeczywistych obiektach oceanotechnicznych.

## **Discussion and studies of the properties of a cooling water additive preventing erosive wear of cooled surfaces of ship diesel engines**

**Key words:** *erosive wear, cooling system, ship diesel engine, corrosion, nickel plating, regressive models*

**Abstract:** This paper presents the results of studies on the properties of an additive administered into the liquid cooling a ship diesel engine. The protective action of the liquid relied on the formation of nickel layers on the cooled surfaces – electroless nickel plating of cooling surfaces. The test stand and the program of the experiment have been described. Statistical methods have been used for discussing the results. Regressive correlations of mass decrease of the studied samples, dependent on the conditions and the experiment program, have been obtained. Sample mass decrease was described as a function of the additive concentration, the flow and the temperature of the cooling liquid supplied by the pump. High effectiveness of the studied additive was presented comparing it with the substances widely applied for this purpose such as EKSTROL and NALCOOL-2000 basing on the verifying exemplary results. Validation of the obtained results carried out on real maritime technical facilities has been described.

## 1. Wprowadzenie

Korozyjne i erozyjne uszkodzenia powierzchni chłodzonych okrętowych silników spalinowych, a w szczególności powierzchni chłodzenia tulei cylindrowych, znacznie obniżają ich trwałość i rewers techniczny. Zasób godzin pracy tulei cylindrowych, poddawanych oddziaływaniu korozyjno-erozyjnemu, maleje do 50 % ich rewersu projektowego. Erozyjne zużycie kołnierza oporowego tulei cylindrowych często staje się przyczyną powstawania pęknięć [3, 4, 5, 10, 11, 14]. Zgodnie ze współczesnymi poglądami, zniszczenia erozyjne tulei cylindrowych rozwijają się kumulatywnie, postępującymi jednocześnie z różną intensywnością, zniszczeniami mechanicznymi jako konsekwencjami współdziałania kawitacji wibracyjnej, kruchości wodorowej i korozji tlenowej. Na rysunku 1 przedstawiono erozyjno-korozyjne uszkodzenia powierzchni chłodzonej tulei cylindrowej silnika okrętowego typu SULZER 8ZAL 40S.



Rys. 1. Erozyjno-korozyjne uszkodzenia powierzchni chłodzonej tulei cylindrowej

Przyczyną rozwoju tych procesów, są drgania tulei cylindrowych od mechanicznego oddziaływania tłoka w chwili przejścia korbowodu przez zwrotne punkty (GMP) i (DMP). Generowane drgania tulei cylindrowych tworzą w cieczy chłodzącej, warunki dogodne do powstawania kawitacji. Wyniki prac doświadczalnych na temat analizy uszkodzeń powierzchni zewnętrznych tulei cylindrowych i powstawania pęknięć pod kołnierzami oporowymi pozwalają wnioskować, iż w większości typów okrętowych silników spalinowych, użytkowanych na statkach morskich, niemożliwym jest całkowite wyeliminowanie procesu niszczenia erozyjno-korozyjnego i powstawania pęknięć, zwłaszcza w silnikach czterosuwowych bezwodnikowych [8, 13].

Na współczesnych statkach towarowych w charakterze dodatków uszlachetniających powszechnie stosuje się produkty firmy UNITOR Ltd. Netherlands, takie jak Dieselguard NB, Rocor NB Liquid oraz Cooltreat AL. Dwa pierwsze produkty są płynnymi związkami chemicznymi opartymi na azotynach (boranach). Zawierają one organiczne inhibitory korozji „typowych” metali żelaznych i nieżelaznych. Stosowane są w zamkniętych układach wody chłodzącej. Stabilna powłoka tlenku, powstająca w wyniku uzdatniania wody chłodzącej, zapobiega korozji elektrolitycznej pomiędzy metalami o różnych potencjałach. Są to produkty zasadowe, dlatego likwidują korozję kwasową, nie oddziałując negatywnie na części niemetaliczne: uszczelnienia, dławice, przewody elastyczne, uszczelki itp. Posiadają istotną zaletę utrzymywania odczynu pH na wymaganym poziomie, nawet przy zbyt dużym dozowaniu tych uzdatniaczy do wody chłodzącej. Posiadają one jednak ograniczenia do stosowania w układach, w których zastosowane są elementy wykonane z aluminium [9].

Cooltreat AL, nowoczesny produkt chemii przemysłowej firmy UNITOR, jest również organicznym inhibitorem korozji o przedłużonej żywotności, przeznaczonym do użycia w zamkniętych układach wody chłodzącej. Jego zaletą jest zapewnienie ochrony przed korozją wszystkim materiałom stosowanym w obiegach chłodzenia silników. W przeciwieństwie do innych produktów, nie zawiera szybko zużywających się komponentów takich, jak np. azotyny czy krzemiany. Opracowany on został na podstawie technologii kwasów alifatycznych. Jest produktem całkowicie organicznym i rozkładalnym biologicznie, a więc spełnia wymagania ochrony środowiska.

Mniej powszechnie stosowane są produkty takich firm jak PEROLIN czy Drew Ameroid oraz dodatki EKSTROL produkcji Centralno Nauczno-Issledowatel'skovo Dizelnovo Instituta, Sankt-Petersburg Rosja i NALCOOL-2000 produkcji Detroit Diesel Corporation Power, Detroit, Michigan, USA. Nie wynika to z faktu jakości, a bardziej z selektywnego zakresu działania w układach chłodzenia silników okrętowych oraz dostępności na świecie – w miejscu postoju statków.

Przedstawione przykładowo współcześnie stosowane na statkach towarowych dodatki uszlachetniające do wody chłodzącej nie zapewniają kompleksowego zabezpieczenia powierzchni chłodzonych przed uszkodzeniami. Dodatki organiczne oparte na olejach, zmniejszając stopień zniszczenia erozyjnego, wywierają niszczące oddziaływanie na uszczelki gumowe. Natomiast dodatki nieorganiczne, ochraniając powierzchnie chłodzone przed zniszczeniami korozyjnymi nie zapewniają ochrony przed erozją. Dlatego też, zapewnienie trwałości tulei cylindrowych silników okrętowych staje się zadaniem złożonym, tak pod kątem zmniejszenia drgań tulei cylindrowych podczas pracy silnika, jak i ze względu na zapewnienie odporności ich powierzchni chłodzonych przed niszczącym oddziaływaniem czynnika chłodzącego.

## **2. Wymagania stawiane dodatkom uszlachetniającym do cieczy chłodzących okrętowe silniki spalinowe**

Analiza skuteczności, stosowanych dodatków w układach chłodzenia silników spalinowych pokazała, że ich własności nie spełniają oczekiwanych wymagań ochrony przed niszczeniem erozyjno-korozyjnym powierzchni chłodzonych [8, 13]. Dodatki emulgujące, tworząc stosunkowo trwałe cienkie warstwy ochronne, oddziałują jednak destrukcyjnie na elementy gumowe uszczelnień. Dodatki inhibitorowe, pozostając biernymi do wszystkich elementów układu chłodzenia, tworzą na ochraniających powierzchniach trwałe warstwy tlenków, które nie chronią powierzchni przed erozją kawitacyjną. Dlatego też, do skutecznego zapobiegania przed zużyciem korozyjno-erozyjnym chłodzonych powierzchni silników spalinowych celowym było opracowanie nowego dodatku, łączącego wszystkie cechy pozytywne i pozbawionego wad, dotychczas stosowanych dodatków [7]. Ważną właściwością takiego dodatku jest zdolność do koagulacji rozpuszczonych w cieczy chłodzącej zarodków kawitacji, z następstwem odgazowania pęcherzyków powietrza i sedymentacją cząstek twardych [13].

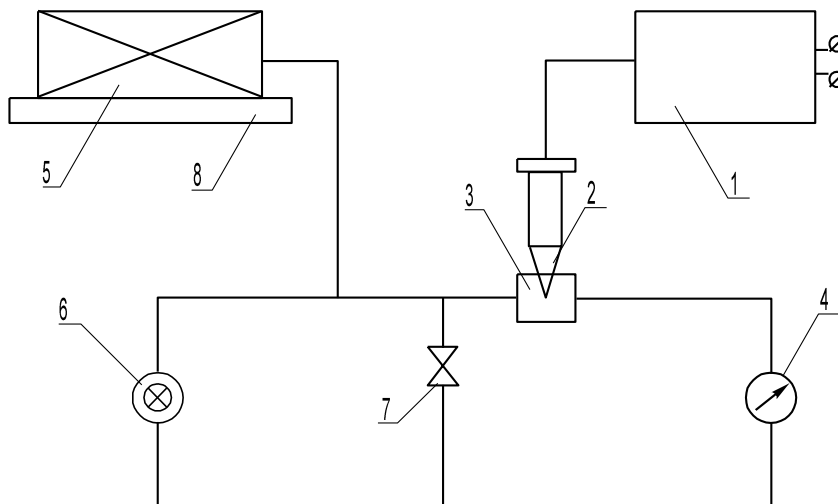
Jednakże w trakcie eksploatacji silnika naniesienie powłok galwanicznych nie jest możliwe, natomiast powlekanie niklem z roztworu dodatku cieczy chłodzącej wydaje się całkowicie realnym. W odróżnieniu od niklowania galwanicznego, przy niklowaniu chemicznym nikiel osadza się na powierzchniach ochraniających bez stosowania zewnętrznego pola elektrycznego. Powłoka powstaje w wyniku powrotu jonów niklu z roztworów w wyniku oddziaływania na nie określonych składników tego roztworu. Zalecanymi składnikami redukującymi mogą być hydrazyna, podfosforan sodowy lub borowodor sodowy [7]. Główną zaletą tej metody jest osadzanie się niklu z prawie stałą szybkością na całej powierzchni chłodzonej. Cienkie warstwy niklu mają tendencję do odtwarzania topografii podstawowej powierzchni, a grubsze wykazują efekt wyrównywania (wygładzania) płaskorzeźby powierzchni. Fakt ten jest niezwykle ważny dla ochrony chłodzonych powierzchni silnika o złożonych kształtach i miejscowych zniszczeniach erozyjnych i korozyjnych. Pokrycia, wytwarzane bez udziału prądu elektrycznego, charakteryzują się dobrą adhezją, plastycznością, drobnokrystaliczną strukturą, a także posiadają ważną zaletę odporności korozyjnej oraz dobre właściwości mechaniczne. Uwzględniając fakt, że kwaśne środowiska przejawiają większą agresywność w stosunku do metali żelaznych, opracowywany dodatek powinien wytwarzać środowisko zasadowe w czynniku chłodzącym. Zaproponowano dodatek ochronny o następującym składzie: siarczan niklu, podfosforyn sodowy, cytrynian sodowy, węglan sodowy, a także poliakrylamid, jako dodatek powierzchniowo czynny [7].

## **3. Stanowisko laboratoryjne i program badań**

Złożoność procesów, zachodzących w warunkach rzeczywistego zużycia erozyjnego elementów silników spalinowych, utrudnia prowadzenie badań identyfikujących wpływ poszczególnych czynników na intensywność erozji kawitacyjnej. W szeregu przypadków uszkodzenia, wywołane erozją kawitacyjną, ujawniają się w ciągu długiego czasu eksploatacji silnika. Dlatego badania eksperymentalne skutecznych właściwości ochronnych dodatku PWTU-2002 przeprowadzono jako ekwiwalentne na stanowisku laboratoryjnym wyposażonym w wibrator magnetostrykcyjny. Wibrator imitował zniszczenia kawitacyjne próbki stalowej umieszczonej w komorze kawitacyjnej, przy różnych parametrach przepływającego przez nią płynu chłodzącego. Badania przeprowadzono zgodnie z wymaganiami normy

GOST 30480-97 „Zapewnienie odporności na zużycie wyrobów. Metody badań odporności na zużycie. Wymagania wspólne” [5], zgodnej (analogicznej) z normą PN-86/H-04427 „Erozja kawitacyjna. Badania odporności materiałów metodą wibracyjną” [6]. Wykorzystanie analogicznej metody badań zjawisk kawitacyjnych opisano w pracy [2].

Opracowując właściwości ochronne dodatku PWTU-2002, w charakterze dodatków referencyjnych wykorzystywano emulgator EKSTROL i inhibitor NALCOOL-2000. Schemat stanowiska laboratoryjnego przedstawiono na rys. 2.



Rys.2. Schemat laboratoryjnego stanowiska badawczego

1 – generator drgań naddźwiękowych UZDN-1; 2 – magnetostrykcyjny generator drgań (wibrator) MSW-2; 3 – kavitacyjna komora doświadczalna; 4 – przepływomierz LT-2-33; 5 – zbiornik kompensacyjny; 6 – pompa cyrkulacyjna UPS 25-40; 7 – zawór obejściowy (by pass); 8 – element grzejny

Badania laboratoryjne prowadzono na próbkach wykonanych z surowego żeliwa Scz 24-36, oszlifowanego i odtłuszczonego. Modelowanie warunków procesów zużycia w układach chłodzenia realizowano w komorze doświadczalnej 3, w której umieszczano dwie próbki: bierną i aktywną. Próbka aktywna, która przy użyciu rozłącznego połączenia gwintowego była sztywno mocowana na głowicy magnetostrykcyjnego wibratora, wykonującego drgania wzdłużne z częstotliwością 22 kHz. Szczelina pomiędzy próbką bierną i czynną była równa 20 mm, co odpowiadało odległości między tuleją a blokiem cylindrowym (w części omywanej wodą chłodzącą) silnika 4 Cz 8,5/11. Badania przeprowadzono dla różnych składów zawartości dodatków w cieczach chłodzących oraz różnych wartości ich parametrów: od wody destylowanej do płynu z różnymi dodatkami, takimi jak: PWTU-2002, EKSTROL i NALCOOL-2000. Przedziały wartości parametrów niezależnych zmienianych w eksperymencie przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Przedziały wartości parametrów niezależnych w eksperymencie

Parametry	Zakresy zmian wartości parametrów			
	Referencyjny	Przedziały zmian	Zakres dolny	Zakres górny
Stężenie dodatku w roztworze C, %				
EKSTROL	0,3	0,2	0,1	0,5
NALCOOL-2000	3	2	1	5
PWTU – 2002	3	1	2	4
Strumień objętości cieczy chłodzącej, $\dot{Q}$ , m <sup>3</sup> /h	0,218	0,064	0,154	0,282
Temperatura cieczy chłodzącej, $t$ , °C	70	10	60	80

Miarą oceny skuteczności działania dodatku w eksperymencie była utrata masy obydwu próbek podczas jednej serii pomiarowej trwającej 4 godziny. Każde doświadczenie, powtarzane trzykrotnie, realizowano według następującej procedury:

- włączano podgrzewacz elektryczny i pompę cyrkulacyjną ustawioną na utrzymanie zadanej wartości strumienia objętości cieczy;
- po ustaleniu się niezbędnej wartości temperatury cieczy w obiegu włączano generator ultradźwiękowy na częstość drgań 18 kHz i wykonywano pomiary.

Zadaną wartość temperatury utrzymywano podczas realizacji danej serii pomiarowej. Zmianę masy badanej próbki określano poprzez ważenie na wadze analitycznej WLR- 200 g-M z dokładnością do  $5 \cdot 10^{-5}$  g. Plan eksperymentu przedstawiono w tabeli 2. Dla prostoty zapisu, w tabelach 3 i 4 oznaczono:

$C = X_1$ ;  $\dot{Q} = X_2$ ;  $t = X_3$ , znakiem (-) dolny zakres parametru, znakiem (+) górny zakres parametru, których wartości podano w tabeli 1.

Tabela 2. Plan eksperymentu

Nr serii pomiarowej	Poziom zakresu parametrów		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	-	-	+
2	-	+	+
3	+	-	+
4	+	+	+
5	-	-	-
6	-	+	-
7	+	-	-
8	+	+	-

Przykładowe wyniki pomiarów dla serii pomiarowych o różnych stężeniach  $C$ , [ %], strumieniach objętości  $\dot{Q}$ , [ $m^3/h$ ] i temperaturze cieczy chłodzącej,  $t$ ,  $^{\circ}C$  przedstawiono w tabelach 3 i 4.

Tabela 3. Wyniki pomiarów wykonanych w wodzie destylowanej

Nr obserwacji	Poziom zakresu parametrów		Ubytek masy próbki aktywnej / biernej [mg]				Odchylenie standardowe z próby S
	$X_2$	$X_3$	m1	m2	m3	m4	
1	-	-	5600/4150	5150/4050	5300/4150	5350/4120	132/32
2	+	-	5350/4200	5450/4300	5700/4350	5500/4280	104/44
3	-	+	5250/4600	5500/4300	5150/4750	5300/4280	104/132
4	+	+	5900/4050	5600/4550	5800/4250	5770/4280	88/145

Tabiela 4. Wyniki badań skuteczności roztworów z dodatkami NALCOOL-2000, EKSTROL i PWTU- 2002

Nr obserwacji	Ubytek masy próbki aktywnej/ biernej [mg] (znak minus w kolumnie PWTU-2002 oznacza przyrost masy)											
	NALCOOL- 2000				EKSTROL				PWTU-2002			
	m <sub>1</sub>	m <sub>2</sub>	m <sub>3</sub>	m <sub>4</sub>	m <sub>1</sub>	m <sub>2</sub>	m <sub>3</sub>	m <sub>4</sub>	m <sub>1</sub>	m <sub>2</sub>	m <sub>3</sub>	m <sub>4</sub>
1	4050/150	3400/200	3800/200	3800/180	4952/1052	4152/800	4700/852	4600/900	-100/-700	-50/-550	-100/-1050	-83/-767
2	4150/150	4400/150	4400/150	4320/150	700/552	825/652	700/752	752/652	-100/-1150	-100/-1750	-100/-1750	-100/-1550
3	1950/350	1900/450	1550/300	1800/370	2052/100	2300/100	2100/100	2152/100	-100/-100	-50/-50	-50/-100	-67/-83
4	3150/200	2100/50	2550/50	2600/100	600/300	525/300	625/152	600/252	-100/-50	-100/-50	0/-50	-67/-50
5	4650/200	4400/150	5200/150	4920/170	4100/400	3900/400	3852/400	3952/400	-100/-400	-100/-900	-50/-750	-83/-683
6	4900/150	5100/150	4750/350	4920/220	3600/452	3400/400	4100/500	3700/452	0/-950	-100/-1200	-100/-800	-67/-983
7	3600/200	4000/300	3550/100	3720/200	3852/452	3100/300	2952/300	3300/352	-50/-100	-100/-100	-50/-50	-67/-83
8	2950/250	2700/250	3150/450	2930/320	3100/200	3352/252	3000/300	3152/252	0/-50	0/-50	-50/-50	-17/-50

Wartości odchyień standartowych wyników pomiarów ubytków masy próbek czynnej i biernej w prowadzonych eksperymentach z dodatkami NALCOOL -2000, EKSTROL i PWTU -2002 przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Odchylenia standartowe ubytków masy próbek w eksperymencie

Lp.	Odchylenie standartowe z próby (S)		
	NALCOOL-2000	EKSTROL	PWTU-2002
1	193/17	59/19	17/148
2	26/0	13/14	0/148
3	132/44	19/0	17/17
4	304/50	7/12	19/0
5	236/17	19/0	17/148
6	101/66	52/7	19/148
7	136/57	70/13	17/17
8	130/66	26/7	17/0

Dokładność pomiarów sprawdzano porównując różnicę obliczonych wartości kryterium t-Studenta z tabelarycznymi wartościami kwantili  $[t_n(p_n)]$  dla danej liczby stopni swobody i przy przyjętym dopuszczalnym prawdopodobieństwie [1].

(1)

gdzie: S – odchylenie standartowe jednej serii pomiarowej,  
 $X^*$  – wartość zmierzona, najbardziej różniąca się od wartości średniej w danej serii,  
 $X_{sr}$  – średnia wartość parametru rozpatrywanej serii pomiarowej.

Warunkiem poprawności sprawdzanej wielkości było spełnienie nierówności:

(2)

Obliczone liczby kryterialne Studenta dla wszystkich wartości zmierzonych ubytków masy w przeprowadzonym eksperymencie wykazały, że nie przekraczają określonego tabelarycznie kwantyla rozkładu t-Studenta  $t_n(p) = 3,182$ , dla warunków eksperymentu: trzech stopni swobody ( $X_1, X_2$  i  $X_3$ ) i przyjętego poziomu ufności  $p = 0,95$ .

#### 4. Opracowanie i analiza wyników badań

Opracowanie wyników badań miało na celu otrzymanie regresyjnych modeli, których adekwatność sprawdzano stosując kryterium Fishera-Snedecora. Otrzymywane wyniki doświadczeń opracowano i analizowano metodami statystyki matematycznej. Obliczenia wykonywano narzędziami statystyki w środowisku Windows, natomiast do ich analizy stosowano współczesną STATISTICĘ firmy StatSoft. Poszukiwano modelu w ogólnej postaci typu:

$$m = b_0 + Cb_1 + \dot{Q}b_2 + tb_2 + C\dot{Q}b_{12} + Ctb_{12} + \dot{Q}tb_{23} \quad (3)$$

gdzie: C – stężenie dodatku w roztworze;  $\dot{Q}$  – strumień objętości cieczy chłodzącej;  
t – temperatura cieczy chłodzącej

Przy opracowaniu liniowych modeli regresyjnych określenie ich współczynników ograniczono się tylko do skutków wzajemnego oddziaływania dwóch parametrów/czynników. Nie uwzględniano wpływu czynników wyższego rzędu. Przy takim założeniu otrzymano modele regresyjne w postaci:  
– dla aktywnej próbki w roztworze dodatku EKSTROL

$$m = 694 + 119C - 181\dot{Q} - 187t + 75C\dot{Q} - 44Ct - 156\dot{Q}t \quad (4)$$

– dla biernej próbki w roztworze dodatku EKSTROL

$$m = 105 - 45C + 4,5\dot{Q} + 14t + 7,5C\dot{Q} - 30Ct - 1,5\dot{Q}t \quad (5)$$

– dla aktywnej próbki w roztworze dodatku NALCOOL-2000

$$m = 3626 - 864C + 66\dot{Q} - 496t - 439C\dot{Q} - 66Ct + 264\dot{Q}t \quad (6)$$

– dla biernej próbki w roztworze dodatku NALCOOL-2000

$$m = 214 + 21C - 16\dot{Q} - 14t - 21C\dot{Q} + 1,25Ct - 23\dot{Q}t \quad (7)$$

– dla aktywnej próbki w roztworze dodatku PWTU- 2002

$$m = -69 + 14C + 6,13\dot{Q} - 10t + 6,38C\dot{Q} - 2,13Ct - 10\dot{Q}t \quad (8)$$

– dla biernej próbki w roztworze dodatku PWTU-2002

$$m = -531 + 465C - 127\dot{Q} - 81t + 144C\dot{Q} + 81Ct - 60\dot{Q}t \quad (9)$$

Funkcji opisujących poszukiwano metodą najmniejszych kwadratów, natomiast procesy iteracyjne oparto na metodzie Quasi-Newtona z przyjętym kryterium zbieżności wyników obliczeń z danymi doświadczalnymi równym 0,05% wartości. W wyrażeniach (4 – 9) określającym wartość ubytku masy stał się wyraz wolny ( $b_0$ ).

W tej sytuacji, na podstawie otrzymanych równań regresji widać, że największe ubytki, zarówno aktywnej, jak i biernej próbki występują w roztworze dodatku NALCOOL-2000. Ubytki masy próbek w roztworze dodatku EKSTROL są mniejsze. natomiast wartości ujemne wyrazu wolnego w równaniach regresji dla próbek badanych w roztworze dodatku PWTU- 2002, wskazują na powiększenie masy próbek w wyniku ukształtowania na ich powierzchniach pokryć niklowych.

Znaki współczynników regresji wskazują na pozytywny lub negatywny wpływ liniowego efektu na wynik doświadczenia. W odniesieniu do różnych dodatków można więc powiedzieć, że wpływ własności zastosowanych w eksperymencie dodatków jest różny. Jest to konsekwencją zróżnicowanych ich własności fizykochemicznych. Na rysunkach 3, 4 i 5 przedstawiono graficznie otrzymane modele intensywności zużycia próbek aktywnych, na których poszczególnym krzywym przypisano następujące warunki eksperymentu:



$$t = 60^0 \text{ C, } Q = 154 \text{ dm}^3/\text{h};$$



$$t = 80^0 \text{ C, } Q = 154 \text{ dm}^3/\text{h}$$

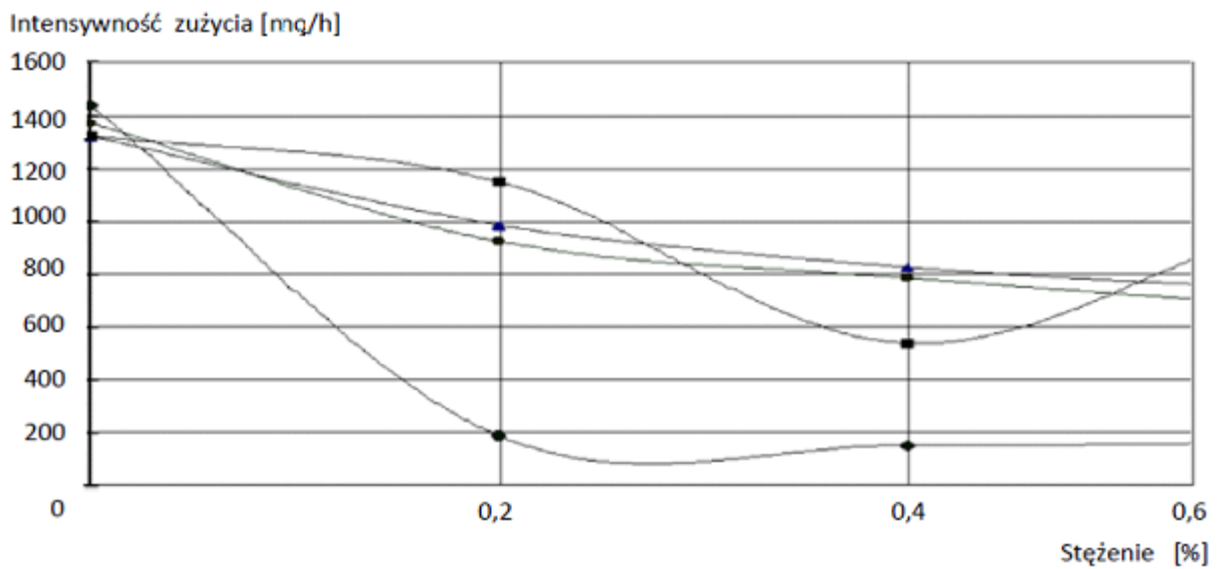


$$t = 60^0 \text{ C, } Q = 282 \text{ dm}^3/\text{h};$$

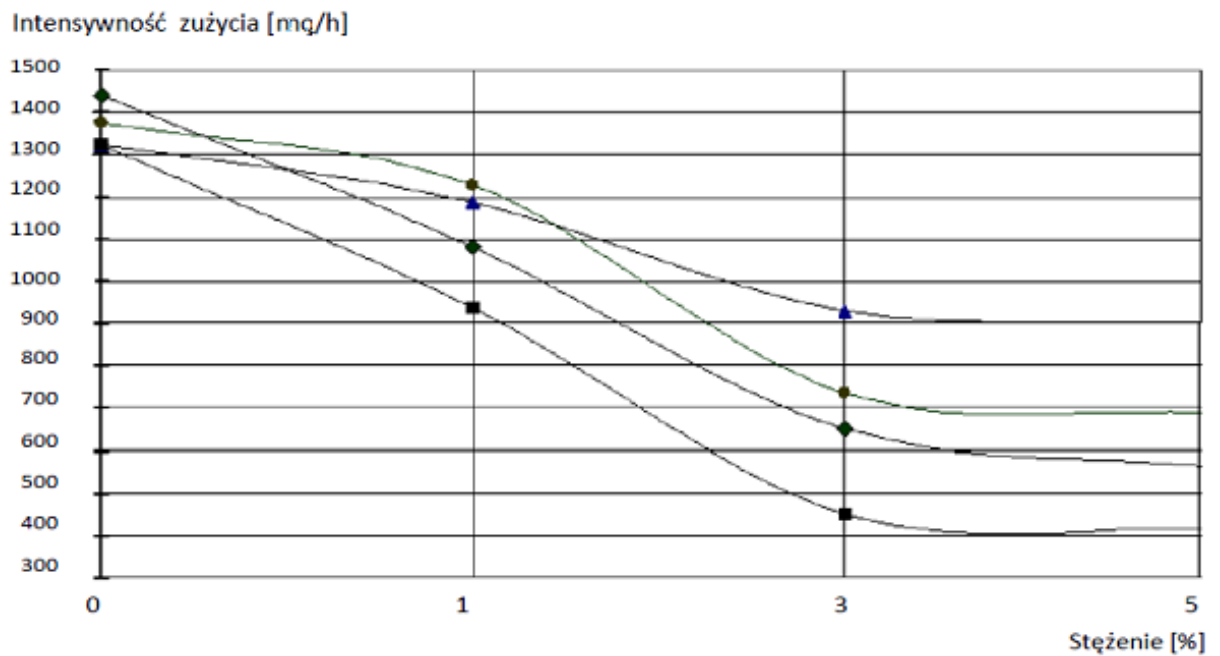


$$t = 80^0 \text{ C, } Q = 282 \text{ dm}^3/\text{h}$$

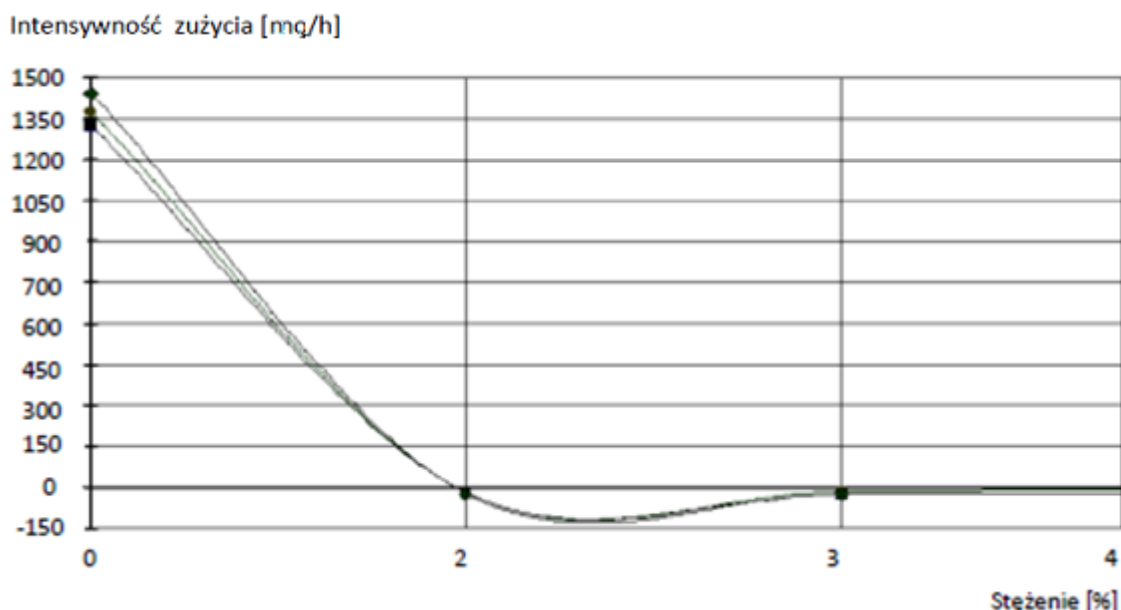




Rys. 3. Intensywność zużycia materiału próbki aktywnej w zależności od stężenia dodatku EKSTROL



Rys.4. Intensywność zużycia materiału próbki aktywnej w zależności od stężenia dodatku NALCCOL-2000



Rys.5. Intensywność zużycia materiału próbki aktywnej w zależności od stężenia dodatku PWTU-2002

Ocena wyników eksperymentu przy stężeniu dodatku PWTU- 2002 w zakresie od 2 do 4 % wykazała, że nastąpiło zwiększenie masy próbek średnio o 83 mg. Powierzchnie, tak próbek aktywnych jak i biernych, stawały się błyszczące, zanikały ślady ubytków korozyjno-erozyjnych. Efekt ten tłumaczy się wytwarzaniem na powierzchniach próbek powłok niklowych.

Zmniejszenie masy nastąpiło wśród próbek poddanych oddziaływaniu magnetostrykcyjnego generatora drgań MSW w roztworach dodatków EKSTROL i NALCOOL-2000. Na ich powierzchniach znajdowały się ślady ubytków korozyjno-erozyjnych w postaci płytkich wżerów po środku próbki oraz ciemnych plam na brzegach.

Analiza krzywych na rysunkach 2-4 pokazała, że wprowadzenie dodatków znacznie zmniejsza intensywność zużycia próbek aktywnych. Optymalne stężenia dodatku PWTU- 2002 wynosi 2,5-3 %, dodatku EKSTROL 0,4-0,5 %, a dodatku NALCOOL-2000 - 3,5 - 4 %. Dalsze zwiększanie stężenia nie wpływało na intensywność niszczenia materiału próbek.

Na podstawie zależności przedstawionych na rysunku 5 można zauważyć, że wzrost temperatury cieczy chłodzącej do 80<sup>o</sup> C, jak i wielkości strumienia cieczy chłodzącej do 282 dm<sup>3</sup>/h nie wpływały na własności dodatku PWTU- 2002. Podczas doświadczeń obserwowano również przyrost masy próbek oraz brak śladów ubytków na ich powierzchniach.

Ochronne działanie dodatków EKSTROL i NALCOOL-2000 zmniejszało się przy małym strumieniu objętości cieczy chłodzącej (154 dm<sup>3</sup> / h), co tłumaczy się obniżeniem właściwości adhezyjnych tych dodatków z podwyższeniem temperatury (rysunki 3 i 4). Jednakże zwiększenie strumienia przepływającej cieczy do 282 dm<sup>3</sup>/h, co odpowiada podwyższeniu ciśnienia hydrostatycznego, spowodowało zmniejszenie intensywności zużycia próbek aktywnych. Takie zjawisko tłumaczy się opóźnionym początkiem procesu parowania i wzrostem odporności na kawitację, przy wzroście ciśnienia wody w układzie.

## 5. Podsumowanie

Wynikiem badań było określenie wartości współczynników równań regresji ubytku masy aktywnych i biernych próbek w roztworach dodatków EKSTROL, NALCOOL-2000 i PWTU- 2002, przy różnych warunkach realizacji eksperymentu. Wiarygodność otrzymanych wartości współczynników funkcji opisujących wyniki doświadczeń określono za pomocą współczynników regresji: dla współczynników stałych w równaniach  $r = 0,99$ ; dla współczynników przy członach liniowych  $r = 0,94-0,96$  i dla członów współoddziaływania czynników  $r = 0,89-0,90$ . Wartości te świadczą o dobrym odzwierciedlaniu przez otrzymane równania regresji wyników modelowania eksperymentu i upowazniają do uogólnień.

Przeprowadzone eksperymentalne badania laboratoryjne na próbkach doświadczalnych i badania na skalę przemysłową na okrętowych silnikach spalinowych potwierdziły antyerozyjne właściwości opracowanego dodatku PWTU- 2002. Wynikiem badań było wdrożenie dodatku do eksploatacji, poprzez zalecanie stosowania dodatku w układach chłodzenia okrętowych silników spalinowych na statkach morskich.

Sprawdzanie właściwości antyerozyjnych dodatku PWTU- 2002 przeprowadzono na skalę przemysłową na okrętowych silnikach spalinowych o zapłonie samoczynnym typu Zulzer 8 AL20/24 i 6 AL20/24, stosowanych w charakterze silników głównych i pomocniczych na jednostce Zarządu Floty Technologicznej Łukoil-Kaliningradmorneft – pływającym dźwigu „Atlet- 4”. Dwa silniki główne i dwa silniki pomocnicze chłodzone były przez układ chłodzenia z chłodnicą centralną. Antyerozyjny dodatek uszlachetniający wprowadzono do układu chłodzenia po przeprowadzeniu średniego remontu stocznioowego silników. Podczas remontu oczyszczono wewnętrzne przestrzenie bloków cylindrowych silników według specjalnie opracowanej metodyki. Defektację zewnętrznych powierzchni tulei cylindrowych przeprowadzono w ramach następnego remontu bieżącego, po przepracowaniu przez silniki główne 2440 godzin i 3500 godzin przez silniki pomocnicze. Badania organoleptyczne nie ujawniły jakichkolwiek korozyjno-erozyjnych ubytków materiału, stwierdzono natomiast błyszczącą powłokę niklową.

## Literatura

1. Bielski A, Ciuryło M. Podstawy metod opracowania pomiarów. Toruń: Wydawnictwo Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, 2001.
2. Chmiel J. Metody badań zjawisk zużycia korozyjno-kawitacyjnego. Stanowisko badawcze. Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, Wydawnictwo AM w Szczecinie, 2005; 179-192.
3. Deku A, Kompella S. Cavitation in Engine Cooling Fluid due to Piston-Cylinder Assembly Forces. Sweden: Department of Mechanical Engineering, Blekinge Institute of Technology, 2006; 68.
4. Holfield, Ron. Cavitation erosion of cylinder lines and how to eliminate it. *Pipeline & Gas Journal*, 1999; 226(3): 36.
5. Norma GOST 30480-97. Obespeczenie iznosostojkosti izdelij. Metody ispytanij na iznosostojkost. Obszie trebowania. Izdatielstvo standartov.
6. Norma PN-86/H-04427. Erozja kawitacyjna. Badanie odporności materiałów metodą wibracyjną.
7. Pimoszenko A.P, Valishin A.G, Komownikowa G.G, Rumin I.W, Astrach O.W. Prisadka k wode teploenergeticzeskich ustanovok. Patent na izobretenie № 2192505 z dnia 10.11.2002.
8. Pogodaew L.I, Kuzmin W.N. Strukturno-energeticzeskie modeli nadeżnosti materiałów i detalej maszyn. Sankt-Petersburg. Akademia Transporta Rossijskoj Federacji, 2006; 608.
9. Product GUIDE – UNITOR Ltd.
10. Steller J, (ed.). International Cavitation Erosion Test. Preliminary Report. Part I: Coordinator's Report, IMP PAN Rep., 1998; 17.

11. Steller J, Krella A. Frakcyjna odporność kawitacyjna materiałów konstrukcyjnych Gdańsk. HYDROFORUM 2005. Wybór referatów konferencyjnych, Wydawnictwo IMP PAN, 2006; 401-418.
12. Suzuki, Keith. Understanding. Centrifugal Pump Cavitation. TAB Journal, 2007; 36.
13. Valishin A.G, Rozen B.S. Kolebania cylindrowych wtulok i predotwraszenie kawitacji w systemach ochłodzenia dizelej. Kaliningrad. Bałtijskaja Gosudarstwiennaja Akademija Rybołownogo Fłota, 2010; 250.
14. Wenge G, Chenqing G, Kang Z, Fusan S. Corelation of cavitation erozion resistance and mechanical properties of same engineering steel. Journal of Materials Science, 2006; 41(7): 2151.