

**ZESZYTY NAUKOWE NR 1(73)
AKADEMII MORSKIEJ
W SZCZECINIE**

EXPLO-SHIP 2004

Jerzy Marek Grudziński

**Badanie skuteczności odolejania
na nowych koalescencyjnych przegrodach filtracyjnych**

Słowa kluczowe: emulsja olejowo-wodna, przegroda filtracyjna koalescencyjna, odolejanie wód zęzowych

Analizowano zjawiska zachodzące w trakcie procesu filtracji emulsji olejowo-wodnej w filtrze koalescencyjnym włókninowym. Dla zadanego przepływu mieszaniny oleju w wodzie przez przegrodę włóknistą, określono skuteczność filtracji η_F i rozkład wielkości cząstek oleju d_o wykorzystując miernik Malvern. Uzyskane wyniki przedstawione na rysunkach i w tabelach należy uznać za zadowalające i spełniające normy IMO.

**The Results of Research on the Efficiency of Oil Separation
in New Coalescence Filter Barriers**

Key words: oil-in-water emulsion, coalescence filter barrier, bilge water oil separation

The article presents the results of an analysis of the phenomena that take place during the process of filtration of the oil-in-water emulsion (oil droplet diameter $<5\mu\text{m}$) in the coalescence unwoven fabric filter. The flow of the oil-water mixture through the unwoven fabric filter barrier has been analyzed. Moreover, the effectiveness of the filtration and the size of oil droplets have been examined. The research results have been presented graphically. The distribution of oil particle sizes and filtration effectiveness have been determined with the use of a Malvern instrument.

Wprowadzenie

Poważnym problemem ochrony środowiska morskiego są zaolejone ścieki wytwarzane przez obiekty pływające. Zanieczyszczenie wód produktami olejowymi¹ przez statki może nastąpić w wyniku:

- wylewania wody balastowej i po myciu zbiorników ładunkowych,
- usuwania wód zęzowych,
- awarii zbiornikowców i innych statków,
- pęknięć przewodów w czasie ładowania i rozładowywania ropy naftowej,
- wycieków olejów z łożysk wałów śrubowych oraz innych elementów ruchomych smarowanych olejami, mających kontakt z wodą [1 – 5].

Wszystkie te zanieczyszczenia charakteryzują się dużą zawartością substancji ropopochodnych, a ich powstawanie jest zjawiskiem praktycznie nie uniknionym.

1. Badania skuteczności odolejania z zastosowaniem przegród FOW, IPP 1449/20 i FINET POP 2 w warunkach laboratoryjnych na modelu filtra

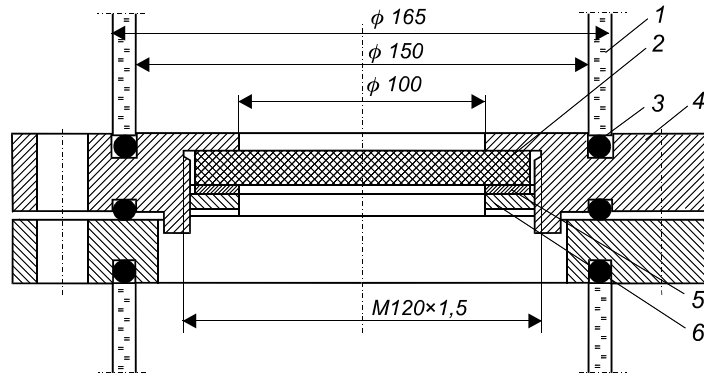
1.1. Założenia do badań

W związku z niejednoznacznym określeniem zjawisk zachodzących na przegrodzie włókninowej [1] w celu sprawdzenia rozważań teoretycznych oraz zbadania skuteczności procesu koalescencji oleju na przegrodzie wielowarstwowej wykonanej z włókien syntetycznych zaprojektowano i wykonano odolejacz modelowy filtra ze szkła (rys. 1).

Przy wyborze rozwiązania konstrukcji filtra do badań założono:

- poziome usytuowanie przegrody i napływ zaolejonej wody od dołu;
- zatrzymywanie oleju na całej powierzchni przegrody oraz w jej wnętrzu, a wydzielanie się go w górnej powierzchni przegrody w postaci kropeł, które odrywając się będą zbierały się w górnej części cylindra;
- odprowadzanie oczyszczonej wody znad przegrody króćcem, tak usytuowanym, aby nie było możliwe dostanie się tam wydzielonego oleju.

¹ **Olej** – zgodnie z konwencją MARPOL [16] i Helsińską [17], należy rozumieć surową ropę naftową, produkty jej przeróbki oraz odpady (np. zaolejona woda zęzowa) zawierające ropę i jej produkty.



Rys. 1. Mocowanie badanej przegrody na filtrze laboratoryjnym: 1 – cylinder szklany, 2 – badana przegroda, 3 – uszczelka, 4 – kołnierz, 5 – podkładka, 6 – nakrętka

Fig. 1. The mounting of the filter barrier

Filtr laboratoryjny (model filtru) (rys. 1) wykonano z dwóch szklanych cylindrów z góry i z dołu zakrytych pokrywami, które ściągnięto szpilkami. W celu dogodniejszej wymiany włókien, w środkowej części umieszczono łatwo dające się rozmontować kołnierze.

Uwzględniając podobieństwa przepływu dynamicznego i kinematycznego w kanałach porów (kapilarach) filtru okrętowego i filtru laboratoryjnego, z zastosowaniem tej samej przegrody, liczba Reynoldsa wynosiła:

$$\text{Re}_R = \text{Re}_M \quad (1)$$

$$\left[\frac{w \cdot d_k \cdot \rho}{\eta} \right]_R = \left[\frac{w \cdot d_k \cdot \rho}{\eta} \right]_M \quad (2)$$

gdzie:

- ρ – gęstość wody,
 - w – prędkość przepływu przez filtr,
 - d_k – średnica kapilary,
 - η – współczynnik lepkości dynamicznej wody,
- indeksy R i M odnoszą się do filtru okrętowego i filtru laboratoryjnego.

Z równania (2) otrzymano:

$$\frac{\rho_R}{\rho_M} \cdot \frac{\eta_M}{\eta_R} \cdot \frac{d_{kR}}{d_{kM}} \cdot \frac{w_R}{w_M} = 1 \quad (3)$$

Zakładając niezmiennosc parametrów ρ , η , d_k uzyskano:

$$w_R = w_M \quad (4)$$

uwzględniając powyższą równość określono strumień objętościowy:

$$q_M = q_R \left(\frac{F_M}{F_R} \right) \quad (5)$$

W badaniach przegród przyjęto strumień objętościowy $q_M = 30\text{--}90$ [dm³/h].

W filtrze modelowym umieszczono różne przegrody włókniste. Badanie danej przegrody przeprowadzono używając modelowej mieszaniny wodno-olejowej: woda wodociągowa – paliwo lekkie (tab. 1).

Tabela 1

Własności paliwa lekkiego
Properties of Diesel oil

Lp.	Nazwa wielkości	Paliwo lekkie
1	Gęstość w 20°C [g/cm ³]	0,8753
2	Lepkość dynamiczna w 40°C [cP]	14,72
3	Lepkość kinematyczna w 40°C [cSt]	17,08
4	Zawartość wody max. [%]	0,10
5	Temperatura zapłonu [°C]	101

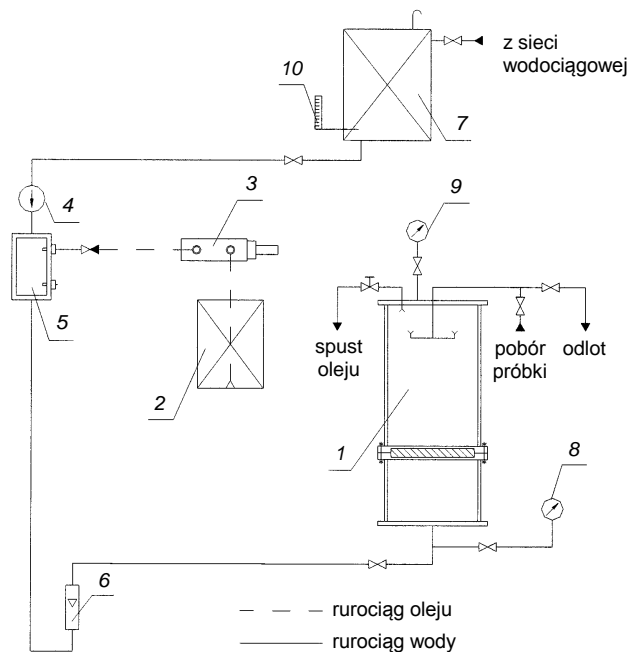
1.2. Filtracyjne przegrody włókniste

Obecnie przegrody wykonane techniką igłowania z różnych włókien naturalnych i sztucznych osiągają skuteczności oddzielania filtrowanych mediów na poziomie 99,9% [10 – 15].

Użyte przegrody włókninowe w badaniach wykonano z surowców sztucznych hydrofobowych włókien PP (4,6 den) i PE (1,5; 4 den), dodatkowo do włókniny FOW wprowadzono cienkie włókna szklane o średnicy 4 μm. W celu wyeliminowania odkształcenia włókien w czasie pracy do włókniny wprowadzono tkaninę wzmacniającą ET z włókien PE (elana-2dtex). Tak wykonane maty poddano dalszej obróbce chemicznej lub termicznej (wygładzaniu) i impregnacji. Cechą charakterystyczną badanych włókien jest wysoka wytrzymałość, niewielki opór przepływu, równomierny rozkład porów i włókien w całej objętości włókniny. Możliwe jest wykonanie włókien wielowarstwowych o różnym stopniu upakowania poszczególnych warstw.

1.3. Stanowisko badawcze

Badania przeprowadzono na stanowisku badawczym zmodernizowanym i dostosowanym do potrzeb badań przegród koalescencyjnych. Schemat stanowiska pokazano na rysunku 2. Zbiornik (7) o objętości 500 dm³ zasilano wodą wodociągową z sieci. Pompa tłokowa (4) o regulowanej wydajności od 0 – 350 dm³/h (za pomocą zmiany skoku tłoka) zasysała wodę z dolnej części zbiornika i przekazywała ją do modelu odolejacza (1) o objętości 12 dm³. Na tłoczniu pompy przed rotametrem (6) umieszczono dozownik oleju (3). Olej dozowano pompą dozującą typu Dyspenser 338 (o wydajności $q_v = 0 - 11,5$ dm³/h ze średnią dokładnością ± 1 mm³/cykl), która pobierała olej ze zbiornika (2). Strumień objętości mieszaniny mierzono rotametrem o zakresie od 0 ± 250 dm³/h. Różnicę ciśnień na filtrze modelowym mierzono manometrami (8) i (9).



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego: 1 – filtr modelowy z badaną przegrodą, 2 – zbiornik oleju, 3 – pompa dozująca Dyspenser 338, 4 – pompa tłokowa o zmiennej wydajności, 5 – układ dozujący, 6 – rotametr, 7 – zbiornik wody $V = 0,5$ m³, 8, 9 – manometry 0 – 0,1 MPa kl 0,6, 10 – termometr

Fig. 2. The diagram of the measuring stand

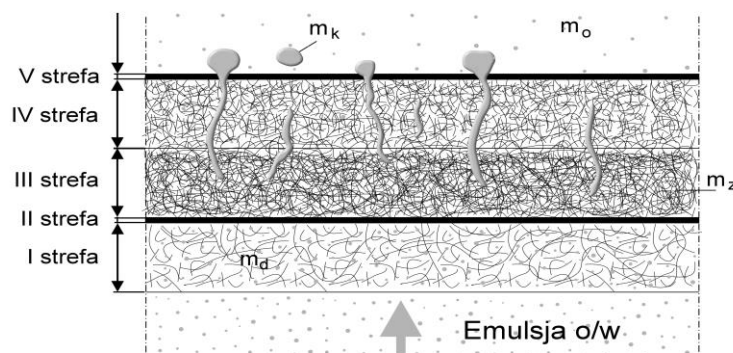
Do pomiaru zawartości oleju za odolejaczem używano miernika HORIBA OCMA-220 o dokładności wskazań $\pm 0,5$ % zawartości oleju w próbce.

Do układu dozowano 1000, 2500, 5000 i 10 000 (1%) oleju (paliwo lekkie), zmieniając strumień objętościowy mieszaniny od 30 – 90 dm³/h. Rejestrowano zmiany w czasie: temperatury, spadku ciśnienia na przegrodzie i stężenie oleju na odlocie oczyszczonej mieszaniny.

Przeprowadzono też badanie rozkładu wielkości cząstek oleju w roztworze po filtracji przez przegrody z użyciem miernika Malvern Instruments Ltd., spełniającego normę ISO 13320/01. Metodą dyfrakcji laserowej wyznacza się rozkład objętościowy i ilościowy w zakresie 0,01 – 2000 μm.

3. Omówienie wyników

Przepływ emulsji przez filtracyjne złożo z przegrodą włóknistą wielowarstwową FOW przedstawiono na rysunku 3. W trakcie przepływu zachodzi koalescencja kropelek oleju z emulsji o/w we wnętrzu kanałów porowych przegrody. Można wyróżnić pięć obszarów, charakteryzujących się różnym stopniem zdyspergowania oleju. W obszarze pierwszym sięgającym tylko nieznacznie w głąb złoża, przepływ emulsji odbywa się bez wyraźnego wpływu wypełnienia na układ. W obrębie tej strefy zdyspergowanie oleju jest takie samo jak przed złożem. W obszarze drugim i trzecim kropelki osiadają na złożu i na oleju poprzednio już zatrzymanym na wypełnieniu. Średnica kropelek powiększa się podczas ich powolnego ruchu w głąb złoża.



Rys. 3. Przepływ emulsji przez złożo z włókniny z jednoczesną koalescencją fazy olejowej: m_d – masa oleju (emulsji) przed przegrodą; m_z – masa oleju zatrzymanego na przegrodzie, m_k – masa kropelek uwalnianych z przegrody, m_o – masa oleju (emulsji) nie zatrzymana na przegrodzie [1]

Fig. 3. The emulsion flow through an unwoven fabric layer with the simultaneous coalescence of the oil phase

Duże krople ulegają koalescencji z małymi kropelkami jak również z tymi, które powiększyły już swoje rozmiary. W miarę zbliżenia się do granicy trzeciej strefy

kapilary w złożu zostają szczelnie wypełnione stykającymi się ze sobą kroplami, niemniej olej występuje w formie nieciągłej. Obszar czwarty charakteryzuje się przepływem zwartej strugi olejowej poprzez część wolnej przestrzeni w złożu. Strefa pierwsza sięga w głąb złoża jedynie kilka milimetrów. Powyższy opis przepływu emulsji przez złożo oparty jest na założeniu, że cała faza olejowa ulega koalescencji i opuszcza złożo w postaci kropeł wielokrotnie większych od występujących w emulsji. Wynika stąd, że w strefie trzeciej i czwartej złoża, w kanalikach nie zajętych przez olej, płynie czysta faza wodna. W rzeczywistości tak nie jest, gdyż część oleju nie ulega koalescencji i będzie opuszczać złożo wraz z fazą wodną w postaci bardzo rozcieńczonej emulsji. Po opuszczeniu złoża duże krople mogą być łatwo usunięte na drodze separacji grawitacyjnej.

Skuteczność filtracji definiuje się jako:

$$\eta = \frac{m_k}{m_d} = 1 - \frac{m_o}{m_d} \quad (6)$$

Po wprowadzeniu stężenia oleju:

$$\eta = 1 - \frac{C_o}{C_d} = 1 - e^{-\frac{4\beta\eta_i L}{d_w(1-\beta)}} \quad (7)$$

gdzie:

C_o – stężenie oleju na wlocie do przegrody [ppm],

C_d – stężenie na odlocie z przegrody [ppm],

$\beta = V_w/V_c$ – współczynnik gęstości struktury przestrzennej (upakowania) filtru, V_w – objętość włókien w filtrze, V_c – objętość filtra,

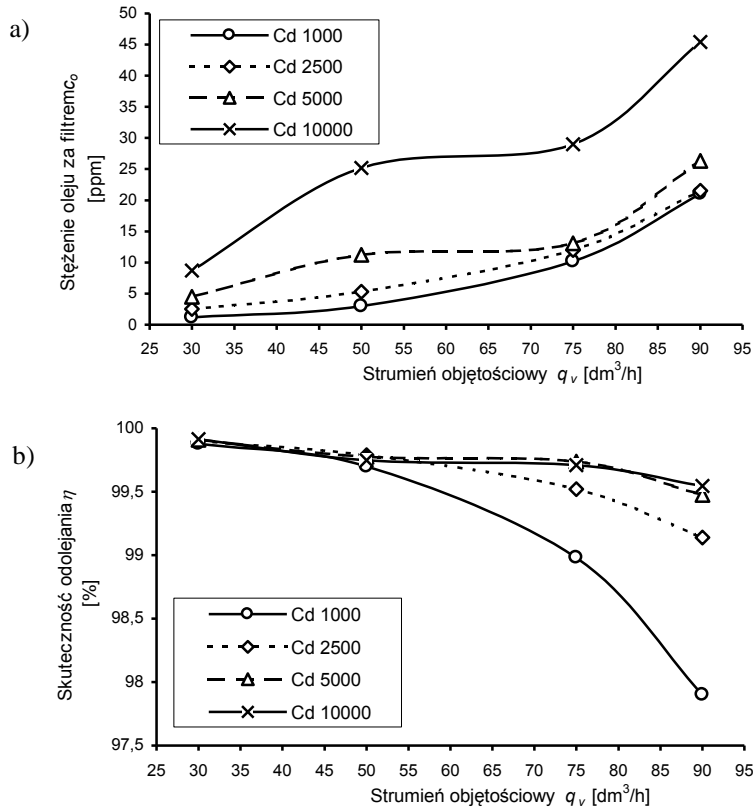
η_i – skuteczność filtracji na powierzchni pojedynczego włókna,

d_w – średnica włókna.

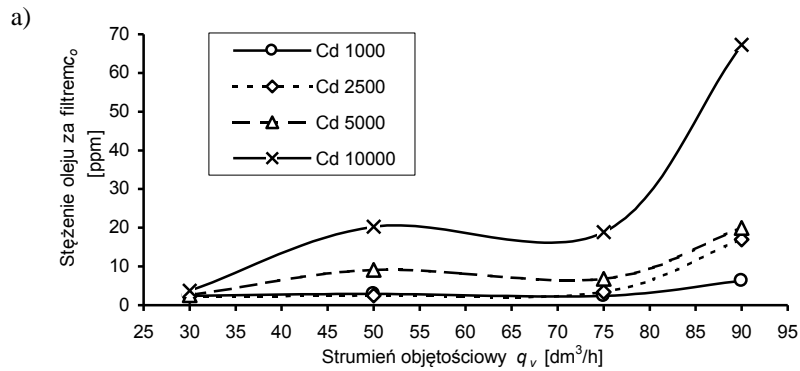
Analizując sprawność odolejania na przegrodach koalescencyjnych włókninowych, można na podstawie badań stwierdzić, że zależy ona od następujących czynników [1 – 9]: własności złoża (materiału, postaci wypełnienia struktury), parametrów procesu (Δp na złożu, w), własności ścieków zaolejonych (c_d , ρ_o) objętościowego rozkładu cząstek oleju, obecności SPC, zanieczyszczeń mechanicznych.

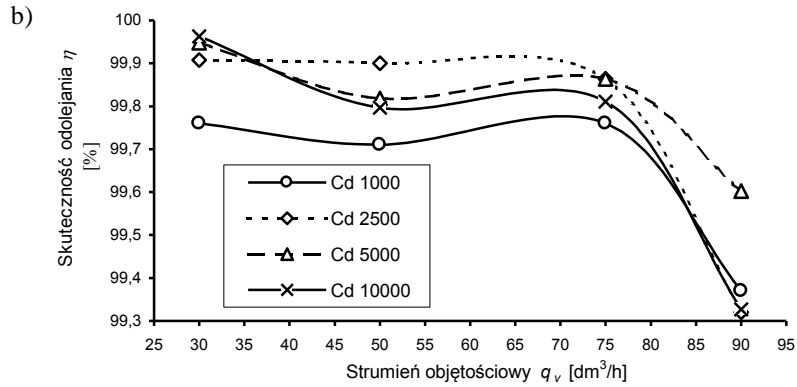
Na rysunkach 4, 5 i 6 przedstawiono wyniki badań skuteczności odolejania na przegrodach włókninowych.

Stężenie oleju za przegrodami włókninowymi nie przekraczają 50 ppm (FOW), 67 ppm (IPP 1449) i 16 ppm (FINET POP2) przy 1% stężeniu oleju przed przegrodą, natomiast przy 0,1% stężeniu oleju, na odlocie uzyskano 4 – 20 ppm.

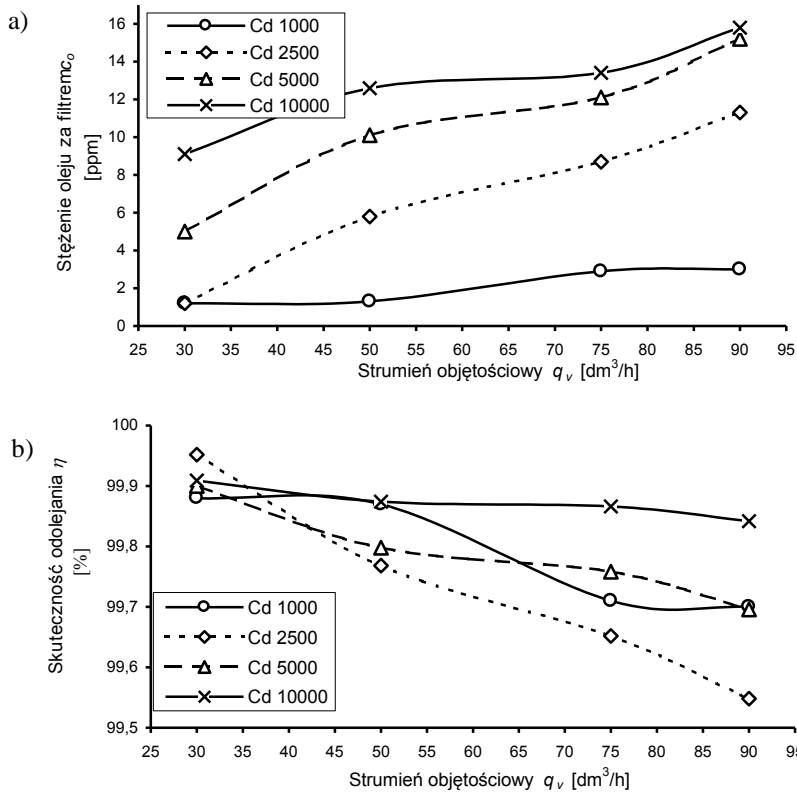


Rys. 4. Wyniki badań skuteczności odolejania przegrody FOW; a) $c_o = f(q_v)$, b) $\eta = f(q_v)$
 Fig. 4. The effectiveness of the FOW barrier during oil separation; a) $c_o = f(q_v)$, b) $\eta = f(q_v)$





Rys. 5. Wyniki badań skuteczności odolejania przegrody IPP 1449/50; a) $c_o = f(q_v)$, b) $\eta = f(q_v)$
 Fig. 5. The effectiveness of the IPP 1449/50 filter barrier during oil separation; a) $c_o = f(q_v)$,
 b) $\eta = f(q_v)$



Rys. 6. Wyniki badań skuteczności odolejania przegrody FINET POP2; a) $c_o = f(q_v)$, b) $\eta = f(q_v)$
 Fig. 6. The effectiveness of the FINET POP2 filter barrier during oil separation; a) $c_o = f(q_v)$,
 b) $\eta = f(q_v)$

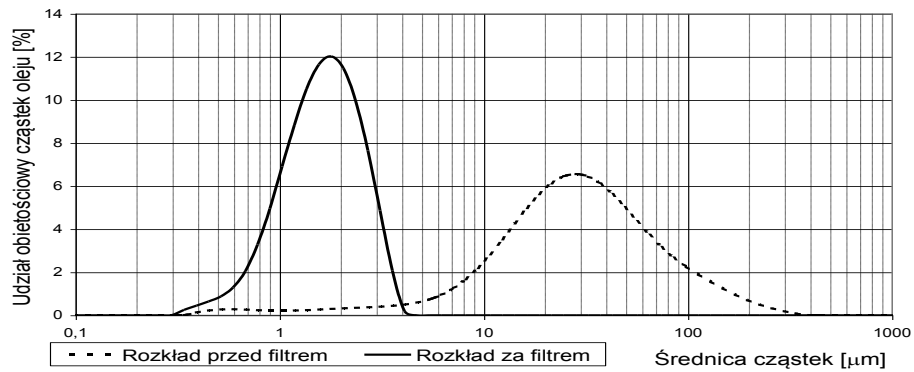
Na rysunkach 7 i 8 zamieszczono rozkład ilościowy i objętościowy cząstek oleju w próbce wody przed i za przegrodą FOW.

W tabeli 2 przedstawiono skuteczność odolejania i parametry procesu na przegrodzie FINET POP2.

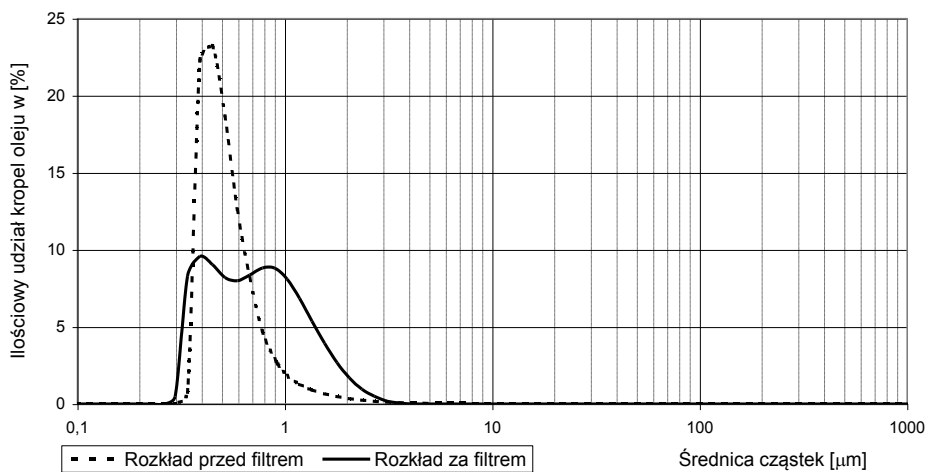
Udział ilościowy i objętościowy określono według wzorów:

$$f_n(x) = \Delta n_i d_i \quad (8)$$

$$f_v(x) = \Delta n_i d_i^3 \quad (9)$$



Rys. 7. Porównanie rozkładu objętościowego mieszaniny wodno-olejowej na przegrodzie FOW
 Fig. 7. A comparison of volumetric distribution of oil particles on the FOW barrier



Rys. 8. Porównanie rozkładu ilościowego mieszaniny wodno-olejowej na przegrodzie FOW
 Fig. 8. A comparison of quantitative distribution of oil particles on the FOW barrier

Tabela 2

Parametry przegrody FINET POP2
Parameters of FINET POP 2 barrier

Parametr	
Ciśnienie przed przegrodą p_d [bar]	0,02
Stężenie oleju na wlocie c_d [%]	0,5
Stężenie na odlocie c_o [%]	0,0016
Skuteczność odolejania η [%]	99,68

3. Wnioski z badań

Opisane w tym artykule eksperymenty wykazały, że uzyskanie zadowalających sprawności filtracji oleju na wybranych przegrodach FOW, IPP 11449/50 i FINET POP2 jest możliwe przy $q_v = 30 \text{ dm}^3/\text{h}$ w zakresie stężeń oleju na dolocie 1000 – 10 000 ppm. Przy wyższych stężeniach następuje wzrost zawartości oleju w wodzie za przegrodą od 23,8 – 45,5 ppm, czyli ponad obowiązującą normę 15 ppm.

Z powyższych obserwacji wynika, że przegrody mogą pracować odolejając paliwo lekkie bez większych zastrzeżeń podczas przepływów o strumieniach objętościowych 50 i 75 dm^3/h , co gwarantuje w miarę wydajną pracę urządzenia odolejającego.

Ponadto pozytywną cechą były małe opory przepływu (w całym zakresie badań przez długi czas pracy), nie przekraczające spadku ciśnienia 0,03 MPa.

Dla przegród FOW wykonano badania rozkładu wielkości cząstek oleju. Rozkład objętościowy na przegrodzie FOW (rys. 7) przed filtrem wykazał, że cząstki oleju występują w przedziale 0,3 – 400 μm , za filtrem przedział ten zmalał do wartości 0,3 – 4,5 μm . Najwięcej cząstek było przed filtrem o średnicy 30 μm , a za filtrem 2 μm . Natomiast z rozkładu ilościowego (rys. 8) wynika, że przed filtrem większość od 10 – 27% była (przed filtrem) 0,4 – 0,7 μm , z kolei za filtrem 0,3 – 1,5 μm . Przegroda FINET POP 2 (wykresu nie przedstawiono) wykazała, że 27% udziału ilościowego stanowią cząstki o średnicy 0,876 [μm], zaś 7,5 % udziału objętościowego stanowią cząstki o średnicy 15,836 [μm].

Uzyskane wyniki sprawności na poziomie 99,7% (tabela 2), są porównywalne i nie odbiegają znacząco od przegród porowatych [1, 5 – 11].

Człon filtracyjny wyposażony w taką przegrodę ma zdolność wydajnej i skutecznej pracy nawet przy bardzo dużych stężeniach dopływającego oleju, co potwierdziły badania laboratoryjne.

Ze względu na niską cenę włóknin nie przewiduje się regeneracji filtrów w odolejaczach.

Literatura

1. Grudziński J., *Filtry koalescencyjne z przegrodą włókninową do odolejania wód zęzowych i balastowych na statkach*, praca doktorska, Raport 61/85, Politechnika Wroclawska 1985.
2. Grudziński J., *Badanie wpływu chemicznych środków myjących stosowanych na statkach na skuteczność odolejania*, Studia Nr 21, WSM, Szczecin 1994.
3. Pat. RP 130413, 1987.
4. Jeffreys G. V., Hauskley I. L., *AICHEJ.*, 11, 413, (1965).
5. Hupka J., *Podstawy wykorzystania koalescencji w złożu w technologii odolejania wód odpadowych*, rozprawa habilitacyjna, Politechnika Gdańska, Wydział Chemii 1988.
6. Spelman L. A., Goren S. L., *Experiments in coalescence by flow through fibrous mats.*, *Ind. Eng. Chem. Fundam.* Vol 1.1no. 1, 1972.
7. Jeater P., Rushton E., Davies G. A., *Coalescence in fibre beds*. *Proceeding of the Filtration Society Birminham Filtration and separation*, IV 1980.
8. Spielman L.A., Yeang-Po Su., *Coalescence of oil in water suspensions by flow through porous media*. *Ind. Eng. Chem. Fundam.* Vol. 16. No. 2, 1977.
9. Chien J., Glooyna E., Scheeliter R., *Device for evaluating coalescence of oil emulsions*. *Journal of the environmentalenta lengieering division*, April 1977.
10. Pat. PL 1400038 1987.
11. Moraczewski A., *Materiały filtracyjne do filtracji powietrza i wody*. *Ochrona Powietrza* nr 3, 1986.
12. Prospekty firmy MITPOL Sp. z o.o. Łódź 2003.
13. Prospekty firm: KORDES, AWAS, Passavant, AWK Unikom System.
14. Prospekty firm: FRAM, VOKES, VAMAG Werke GmbH.
15. Malaczyński M., *Technika ochrony przed zanieczyszczeniami ze statków*. Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1979.
16. Międzynarodowa konwencja o zapobieganiu zanieczyszczaniu morza przez statki (MARPOL 73/78), PRS, Gdańsk 1997.
17. Nowa Konwencja Helsińska, *HELCOM* Dz. U. nr 28 poz. 346, z dnia 14.04.2000.

Wpłynęło do redakcji w lutym 2004 r.

Recenzenci

dr hab. inż., kmdr Zbigniew Korczewski, prof. AMW
prof. dr hab. Yury Kravtsov

Adres Autora

dr inż., of. mech. okr. II kl. Jerzy Grudziński
Akademia Morska w Szczecinie
Instytut Technicznej Eksploatacji Siłowni Okrętowych
70-500 Szczecin, ul. Wały Chrobrego 1/2