



# Autokompresja jako sposób akumulacji energii odpadowej podczas wynurzania się autonomicznego modułu transportowego wykorzystującego zmianę wyporności

Wiktor FILIPEK<sup>1)</sup>, Krzysztof BRODA<sup>†2)</sup>

<sup>1)</sup> Akademia Gorniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Inżynierii Łądowej i Gospodarki Zasobami; ORCID: 0000-0001-5472-8214; ResearcherID: W-5254-2018; Scopus: 36185413000; PBN: 5e70922b878c28a047391056

<sup>2)</sup> Akademia Gorniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Inżynierii Łądowej i Gospodarki Zasobami; ORCID: 0000-0001-8218-9350; ResearcherID: D-2256-2018; Scopus: 55658644400; PBN: 5e70922b878c28a047391048

<http://doi.org/10.29227/IM-2024-01-107>

Submission date: 20-05-2024 | Review date: 22-06-2024

## Abstrakt

Mimo trwającej od kilku lat pandemii Covid-19 nie słabnie zainteresowanie eksploatacją złóż zalegających na dnie mórz i oceanów na dużych głębokościach. Zostało opracowanych wiele nowych koncepcji eksploatacji złóż morskich. Powstało wiele konsorcjów zainteresowanych działalnością górnictwem na morzach i oceanach. I chociaż najbardziej zaawansowane przedsięwzięcie Firmy Nautilus-Minerals nie zakończyło się jak dotąd sukcesem ale od strony badawczej i technologicznej poczyniło ogromny krok do przodu. Prawdopodobnie eksploatacja na skalę przemysłową rozpocznie się w najbliższych latach zwłaszcza na wodach EEZ (Exclusiv Economic Zone). W ostatnim czasie władze Wysp Cooka udzieliły trzy licencje na tego typu działalność. Na wodach międzynarodowych musimy niestety jeszcze poczekać na rozwiązania prawne satysfakcjonujące wszystkie zainteresowane strony. Eksploatacja złóż szelfowych prowadzona jest z powodzeniem różnymi metodami w wielu regionach na świecie (Karlic, 1984; Depowski et al., 1998; Abramowski, Kotliński, 2011; Niedoba 2015, SPC 2013; Sharma, 2017) jednak sięgnięcie po złoża masywnych siarczków polimetalicznych czy kongregacji polimetalicznych zalegających na dużych głębokościach stawia przed naukowcami i inżynierami bardzo duże wymagania. Jednym z największych jest opracowanie metody transportu urobku z dna na powierzchnię morza.

Autorzy od kilku lat prowadzą badania teoretyczne i eksperymentalne nowych koncepcji transportu z dna morskiego, wyniki których przedstawili w publikacjach (Filipek, Broda: 2016, 2017, 2018, 2019, Broda, Filipek, Tora 2023).

W trakcie rozważań różnych koncepcji transportu z dna morskiego z wykorzystaniem modułu autonomicznego, zwróciliśmy uwagę na straty energii podczas wymiany medium roboczego między autonomicznym modułem transportowym a otoczeniem (wodą morską). W artykułach (Filipek, Broda 2018, 2019) skupiliśmy się nad pozytywnym aspektem tej wymiany, ale niestety są to jednak straty energii. W niniejszej publikacji autorzy analizują jaką część tej energii można wykorzystać (w autokompresji) i jaki ma to wpływ na bilans energetyczny modułu transportowego.

**Słowa kluczowe:** górnictwo morskie, transport z dużych głębokości, autonomiczny moduł transportowy

## 1. Wstęp

Od kilku lat autorzy prowadzą badania związane z transportem urobku z dna morskiego na powierzchnię (Filipek, Broda 2015, 2016, 2017, 2019, 2023, Broda, Filipek, Tora 2023) będącym ciągle największym problemem technicznym w górnictwie morskim (odkrywkowym) a zwłaszcza kiedy transport urobku odbywa się z dużych głębokości. Liczne opracowania dotyczące dotychczas stosowanych rozwiązań opartych o metody: czerpakowo-linową CLB (continuareline bucket), hydrauliczną HP (hydraulic pumping), air-liftu ALP (air-lift pumping) czy mieszane (Sharma 2017, SPC 2013, The Royal Society 2017) dalekie są od ideału. Ich największą wadą jest duża energochłonność generująca wysokie koszty. Dlatego ciągle prowadzone są badania nad nowymi rozwiązaniami, w których zarówno eksploatacja jak i transport odbywały by się w sposób mało uciążliwy dla środowiska (Jones DO i inni, 2019).

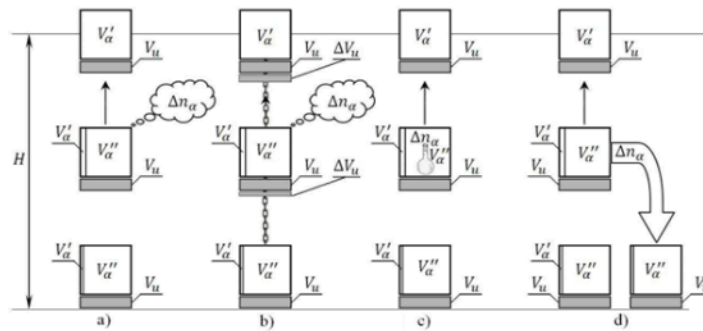
W naszych badaniach naukowych postanowiliśmy spojrzeć na ten problem z perspektywy nowego źródła energii opartego o koncepcję wykorzystania, jako źródła energii do transportu z dna morskiego, procesu przemiany fazowej ciała stałego lub cieczy w stan gazowy lub ciała stałego w ciecz, któ-

rą to idee w formie podsumowania wcześniejszych publikacji autorzy przedstawili w artykule (Broda, Filipek, Tora 2023).

Charakterystyczną własnością odróżniającą tą koncepcję od rozwiązań stosowanych aktualnie jest możliwość wykorzystania (w kolejnym cyklu) części energii, która została wygenerowana lub jest konieczna do zapoczątkowania procesu wynurzania modułu transportowego. W dotychczas stosowanych metodach CLB czy HP, transportu urobku z dna morskiego, całkowita energia, którą musieliśmy użyć jest bezpowrotnie tracona. We wcześniejszych artykułach (Filipek, Broda 2017; Broda, Filipek, Tora 2023) zaproponowaliśmy i omówiliśmy cztery koncepcje wykorzystania przemiany fazowej do transportu z dna morskiego, które przedstawiono na Rys. 1.

Ciekawym rozwiązaniem wartym wspomnienia jest koncepcja przedstawiona na rys. 1b umożliwiającą odzyskanie nawet do 90% energii. Została ona omówiona w publikacji „The theoretical basis of the concept...” (Filipek, Broda 2017, Broda, Filipek, Tora 2023). Natomiast koncepcje w wersji rys.1c i rys.1d zostały omówiono w kolejnych artykułach (Filipek, Broda 2017, 2018).

W niniejszym artykule koncentrujemy się na nie omawianym do tej pory szczegółowo przypadku rys.1a. W metodzie



Rys. 1. Ilustracja przedstawiająca cztery koncepcje realizacji wykorzystanie przemiany fazowej z ciała stałego lub cieczy w stan gazowy do transportu urobku z dna morskiego (Broda, Filipek, Tora 2023)

Fig. 1. Illustration showing four concepts for implementing the phase transformation from a solid or liquid to a gaseous state to transport spoil from the seabed (Broda, Filipek, Tora 2023)

tej rozważamy ruch jednego modułu transportowego z danej głębokości na powierzchnię. Na głębokości, z której rozpoczyna się proces wynurzenia musimy doprowadzić do sytuacji, w której całkowita gęstość modułu (wraz z transportowanym urobkiem) musi być mniejsza niż gęstość otaczającej go wody. Realizujemy to wykorzystując medium transportowe, którym jest czynnik roboczy – ciecz lub gaz o gęstości mniejszej od wody co automatycznie zainicjuje proces wynurzenia. W niniejszej publikacji nie koncentrujemy się na sposobie zainicjowania procesu wynurzenia, co omawialiśmy we wcześniejszych artykułach (Filipek, Broda 2016, 2017) przyjmując w naszych rozważaniach, że proces ten (wynurzenie) jest już zainicjowany. Przyjmijmy, że wykorzystanym czynnikiem roboczym jest azot. Jak wiadomo przy tak wysokich ciśnieniach panujących na dnie oceanów w miejscach występowania złóż minerałów interesujących z punktu widzenia gospodarki, gęstość skompresowanego azotu jest znaczna i tak na głębokości 10 km wynosi ok 600 [kg/m<sup>3</sup>]. Natomiast na powierzchni (czyli przy ciśnieniu atmosferycznym) wynosi 1.1 [kg/m<sup>3</sup>]. Wynika z tego, że przy założeniu stałej objętości zajmowanej przez medium transportowe musimy się pozbyć nadmiaru rozprężającego się azotu, tak aby ciśnienie wewnątrz modułu zrównoważyło się z ciśnieniem otoczenia lub przyjęło wartość bezpieczną dla konstrukcji. Jednak to nie kryteria bezpieczeństwa decydują o konieczności wymiany medium roboczego z otoczeniem, a kryterium fizyczne. Rozważany moduł transportowy po wynurzeniu i rozładunku urobku, musi mieć gęstość większą od otaczającej go wody morskiej. We wcześniejszych publikacjach (Filipek, Broda 2017; Broda, Filipek, Tora 2023) przedstawiono kilka sposobów rozwiązania tego problemu. W związku z tym, w niniejszym artykule nie będziemy omawiać tej kwestii. Zaznaczyć jednak należy, że w proponowanych rozwiązaniach konieczne jest wyrównanie ciśnienia wewnątrz modułu z otoczeniem. Realizujemy to jak schematycznie przedstawiono na rys. 1a poprzez upust medium transportowego (w tym przypadku azotu) do otoczenia. Niestety związane jest to z dużą stratą energii.

$$E_{str} = \int_H^0 p(h)V(h)dh \quad (1)$$

Gdzie:  $E_{str}$  – całkowita strata energii w rozważanym procesie wynurzenia;

$p(h)$  – ciśnienie na danej głębokości;

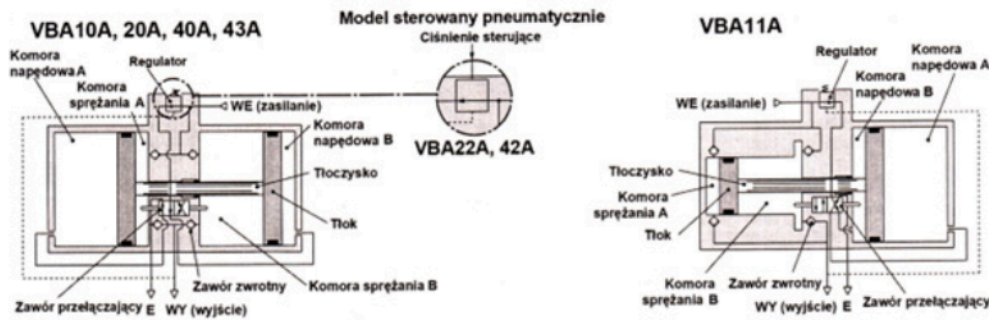
$V(h)$  – objętość uwolnionego do otoczenia na danej głębokości czynnika roboczego.

Nadmienimy tu, że swobodne rozprężanie powodujące straty energii, charakteryzujące się zmniejszaniem gęstości modułu, jest cechą pozytywną pozwalającą na zwiększenie masy transportowanego urobku w procesie wynurzenia. Natomiast w rozważanej niniejszej publikacji dotyczącej koncepcji rys.1a zajmiemy się próbą wykorzystania tej traconej bezpowrotnie do otoczenia energii i zastanowimy się jaką część tej energii  $E_{str}$  jesteśmy w stanie wykorzystać. Przy czym nie zapominając, że cały czas zachodzi swobodna wymiana masy z otoczeniem będąca źródłem energii w procesie autokompresji. Do tego celu wykorzystamy wzmacniacz ciśnienia. Do symulacji zachodzących procesów, z uwagi na to, że przyjętym medium roboczym jest gaz azot, którego gęstość jest ściśle uzależniona od ciśnienia i temperatury (otoczenia), wykorzystamy dane rzeczywiste pobrane ze strony NOAA dla wybranego punktu EX1504L2.

## 2. Wzmacniacz ciśnienia

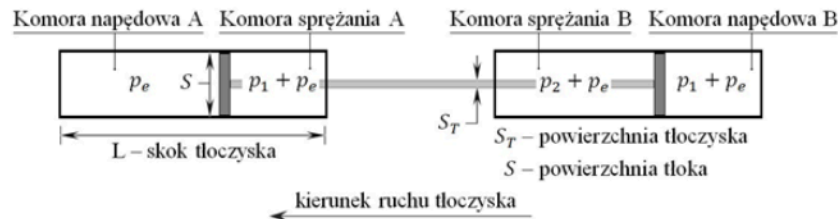
Wzmacniacze ciśnienia funkcjonują na rynku od wielu lat pozwalając m.in. na utrzymanie niskiego poziomu ciśnienia w systemach sieci zasilających maszyny, które wymagają wysokiego ciśnienia roboczego. Wzmacniacz ciśnienia posiada trzy przyłącza oznaczone najczęściej jako WE czyli wejście, WY wyjście oraz E odpowietrzanie. Do przyłącza WE podłączamy dostępne źródło sprężonego medium. Na wyjściu WY otrzymujemy wzmocniony sygnał wejściowy (ciśnienie). Natomiast przyłączy E służy do tzw. odpowietrzania czyli pozbycia się do otoczenia medium nie wykorzystanego w procesie wzmacniania. Zgodnie z przedstawionym schematem wzmacniacza na rys.2 w konstrukcji urządzenia możemy m.in. wyróżnić: komory napędowe A i B, komory sprężania A i B, cztery zawory zwrotne, zawór przełączający oraz regulator ciśnienia. Praca urządzenia odbywa się w dwóch naprzemiennych, powtarzających się cyklach. Sprężone medium poprzez zawór regulacyjny dostarczane jest do komory napędowej A oraz sprężania B poprzez zawory zwrotne, powodując ruch posuwisty tłoczyska. W konsekwencji następuje kompresja medium znajdującego się w komorze sprężania A. Poprzez zawór zwrotny sprężone medium podawane jest na wyjście WY. W tym samym czasie z komory napędowej B poprzez zawór przełączający medium dostarczane jest do zaworu odpowietrzającego E. Po osiągnięciu końcowego położenia tłoczyska, układ przełącza się w taki sposób, że poszczególne komory pracują w analogiczny jak poprzednio powodując ruch tłoczyska w przeciwną stronę, gdzie komory oznaczone A pełnią funkcję komór B i na odwrót.





Rys. 2. Schematy przykładowych wzmacniaczy ciśnienia firmy SMC

Fig. 2. Schematics of sample SMC pressure amplifiers (<https://www.smc.eu/pl-pl/products/vba-wzmacniacz-cisnienia-169589~nav>)



Rys. 3. Schematy pracy wzmacniacza ciśnienia

Fig. 3. Pressure amplifier operation diagrams

Zasada działania wzmacniacza ciśnienia oparta jest o prawo Pascala i jest podobna do zasady działania prasy hydraulicznej (różnica średnic tłoków przekłada się na różnicę ciśnień). Przykładowe wzmacniacze ciśnienia firmy SMC przedstawia rys.2.

Producent również podaje procedurę doboru modelu wzmacniacza i konfiguracji całego układu sieci zasilającej. W konstrukcji wzmacniacza ciśnienia należy zwrócić uwagę, że aby zawór przełączający zadziałał, musi tłoczysko wraz z dwoma tłokami posiadać odpowiedni pęd, który kształtowany jest różnicą ciśnień między obszarami ciśnienia wejścia i ciśnienia odpowietrzania. Należy mieć na uwadze, że dodatkowe straty ciśnienia w pracy wzmacniacza (poza zaworem przełączającym); przyłączami (WE, WY, E), oporami ruchu tłoka powoduje praca zaworów zwrotnych. Dla każdego typu wzmacniacza producent podaje charakterystyki tych urządzeń, w szczególności wartości uzyskanego ciśnienia po stronie WY (wzmacnianego) oraz odpowiadający mu wydatek przepływu. Niestety wartości strat producent nie podaje. Z tego też powodu na tym etapie naszych rozważań teoretycznych te straty określimy w sposób pośredni. W tym celu zdefiniujemy współczynnik  $\alpha$  (5), którego wartość będzie informowała nas pośrednio o stratach. Straty te związane są ze spadkiem ciśnienia na zaworach zwrotnych i na zaworze przełączającym oraz tarciem elementów mechanicznych. Konstrukcja wzmacniacza ciśnienia kompensuje wymienione straty w bardzo prosty sposób poprzez dobieranie średnicy tłoczyska.

### 3. Określenie parametrów pracy wzmacniacza ciśnienia pracującego w module transportowym

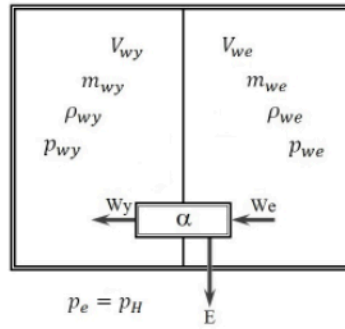
W celu określenia interesujących nas parametrów, a szczególności ich wpływu na pracę wzmacniacza ciśnienia posłużymy się uproszczonym schematem jego działa przedstawionym na rys. 3. Z uwagi na to, że powyżej zdefiniowaliśmy współczynnik  $\alpha$ , którego wartość informowała nas pośrednio

o stratach, na schemacie pracy wzmacniacza pominięto zawór regulacyjny, zawory zwrotne, zawór przełączający oraz tarce elementów mechanicznych. Ponadto z uwagi na fakt, że najistotniejsze jest przedstawienie idei pracy wzmacniacza ciśnienia wybrano jego najprostszą postać składająca się z dwóch identycznych współpracujących ze sobą siłowników o tych samych przekrojach powierzchni tłoka S.

Jak widać na schemacie tłoczyska siłowników o tych samych polach przekroju  $S_T$  są ze sobą sztywno połączone stanowiąc tak naprawdę jeden element. Ponieważ tak jak to wcześniej zdefiniowaliśmy, rozważamy dwa takie same siłownik, w związku z tym również skok tłoczyska L jest taki sam dla obu. Przy czym tak zdefiniowany parametr L czyli skok tłoczyska (siłownika pneumatycznego) to odległość pomiędzy końcem tłoczyska w stanie wsuniętym (komora A) i wysuniętym (komora A). Tak przyjęta budowa wewnętrzna wzmacniacza ciśnienia generuje dwa identyczne obszary A i B. Wewnątrz tych obszarów porusza się tłok rozdzielając każdy z nich, na dwa dodatkowe obszary o zmiennej objętości w funkcji ruchu tłoczyska. Komory napędowe A i B są to te obszary, w których zmienność objętości wynika tak naprawdę z ruchu tłoka napędzanego tłoczyskiem. Natomiast komory sprężania A i B są to te obszary, w których zmienność objętości wynika ze zmiany położenia zarówno tłoka jak i poruszającego się w tym obszarze tłoczyska. Przyjmując do rozważań ruch tłoczyska przedstawiony na rys. 3 rozkład sił w siłownikach możemy przedstawić poniższym równaniem:

$$(p_1 + p_e)(S - S_T) - p_e S + (p_1 + p_e)S - (p_2 + p_e)(S - S_T) = 0 \quad (2)$$

Nadmienić trzeba w tym miejscu, że w przypadku ruchu tłoczyska w przeciwną stronę co jest również związane z zamianą wartości w rozważanych obszarach czyli komory oznaczone symbolem A pełnią funkcję komór B i na odwrót, otrzymujemy dokładnie identyczne równanie (2).



Rys. 4. Schematy modułu transportowego z uwzględnieniem tylko obszaru autokompresji  
Fig. 4. Schemes of the transport module taking into account only the autocompression area

Stąd po przekształceniach równania (2) otrzymujemy:

$$p_1(2S - S_T) - p_2(S - S_T) = 0 \quad (3)$$

Czyli

$$p_1(2S - S_T) = p_2(S - S_T) \quad (4)$$

Zdefiniujmy teraz bezwymiarowy współczynnik  $\alpha$ , którego wartość zawsze będzie mniejsza od jednego.

$$\alpha = \frac{S - S_T}{S}, \alpha < 1 \quad (5)$$

Po obustronnym podzieleniu równania (4) przez powierzchnię tłoka  $S$  i uwzględnieniu współczynnika  $\alpha$  mamy

$$p_1(1 + \alpha) = p_2\alpha \quad (6)$$

Z zależności tej (6) możemy wyznaczyć wartość ciśnienia  $p_2$  (7),

$$p_2 = p_1 \frac{1 + \alpha}{\alpha} > 2 \quad (7)$$

którego wartość zawsze będzie większa od dwóch.

Możemy również równanie (6) zapisać w innej postaci (8)

$$p_1[(1 - \alpha) + 2\alpha] = p_2\alpha \quad (8)$$

Mnożąc równanie (8) przez powierzchnię tłoka  $S$  i uwzględniając chwilowe położenie tłoka ( $L - x(t)$ ) gdzie  $x(t)$  przyjmuje wartości z zakresu od 0 do  $L$  otrzymujemy postać (9),

$$p_1S[(1 - \alpha) + 2\alpha][L - x(t)] = p_2S\alpha[L - x(t)] \quad (9)$$

która to postać wyraża zasadę zachowania energii ponieważ wymiar jednostki jest [J].

Wróćmy do równania (8) możemy go przekształcić do postaci (10)

$$2p_1 = p_2 - p_1 \frac{1 - \alpha}{\alpha} \quad (10)$$

Uwzględniając ciśnienie  $p_e$  czyli otoczenia otrzymujemy następującą postać równania (10)

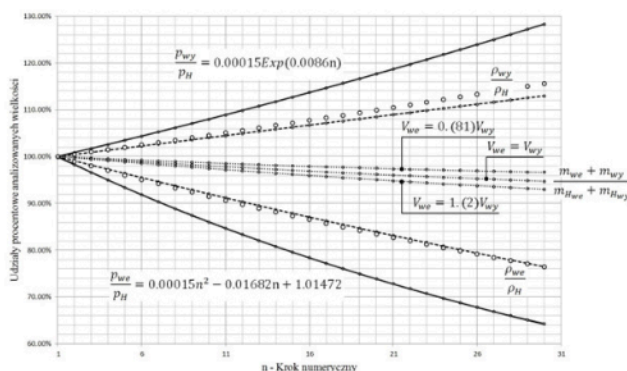
$$p_{wy} = 2p_{we} = (p_2 + p_e) - p_{str} \quad (11)$$

$$p_{str} = p_{we} \frac{1 - \alpha}{\alpha}$$

Analizując równanie (11) widzimy, że aby wzmocnienie wzmacniacza ciśnienia nie było mniejsze niż dwa to suma wszystkich strat ciśnienia nie może być większa od członu  $p_{str}$ . Ponadto wyraźnie widać, że przyjęty bezwymiarowy współczynnik  $\alpha$  wyrażony zależnością (5) informuje nas w sposób pośredni o stratach w analizowanym urządzeniu. Nadmienić należy również, że w przypadku kiedy  $p_{wy}$  osiągnie wartość  $2p_{we}$ , a nie będzie odbioru medium o ciśnieniu  $p_{wy} \leq 2p_{we}$  to układ przestanie pracować osiągając stan równowagi równanie (11).

Należy zwrócić uwagę, że przedstawiony powyżej wywód jest nie do końca precyzyjny i może wprowadzać w błąd. Wiadomo, że wartości ciśnienia w poszczególnych komorach wzmacniacza ciśnienia są ściśle uzależnione od położenia tłoczyska. Natomiast w trakcie wyprowadzenia zależności (11) nic na ten temat nie było mówione. Wyjaśniamy to poniżej. Równanie (2) jest poprawne a więc równanie (11) też. Wspomnieliśmy wcześniej, że równanie (9) tak naprawdę przedstawia zasadę zachowania energii i w rozważanym przypadku spełnia funkcję podobną do równania Bernoulliego (Roberson, Crowe 1995; Roberson, Cassidy, Chaudhry 1995), w którym również występują współczynniki strat tzw.  $\lambda$  – straty liniowe oraz  $\zeta$  – straty lokalne (Walden, Stasiak 1971). Ponadto równanie Bernoulliego możemy przedstawiać w różnych postaciach, w których poszczególne człony mogą przyjmować jednostki np. wysokości [m], ciśnienia [Pa] i dalej będzie ono wyrażało zasadę zachowania energii. Wprowadziwszy współczynnik  $\alpha$  możemy zdefiniować straty ciśnienia  $p_{str}$  i podobnie jak w równaniu Bernoulliego uwzględnia ono straty na tarcie wewnętrzne oraz straty miejscowe w płynie związane z lepkością i nagłymi zmianami przekrojów itd. Jeżeli ciśnienie w zewnętrznym układzie podłączonym do przyłącza WY jest niższe niż wyznaczone z równania (11) to do momentu kiedy się nie zrównoważą w komorze sprężania następuje spręż do odpowiedniej wartości bez wymiany medium na zewnątrz. Dzieje się to kosztem zmniejszenia objętości komory sprężania B co jest uwarunkowane przesuwaniem się tłoczyska. Tak więc wartość ciśnienia określona równaniem (11) informuje nas o maksymalnej wartości ciśnienia  $p_{wy}$  jakie wzmacniacz ciśnienia może wygenerować. Wartość ta jest jednak ściśle związana z osiągnięciem odpowiedniego położenia tłoczyska. Położenie to można wyznaczyć znając wartość  $p_{wy}$ . Dla tej wartości należy określić wartość gęstości medium sprężanego i mając tą wartość można wyznaczyć jej objętość, a więc i położenie tłoczyska. Należy jednak zauważyć, że dla gazów zależność gęstości od ciśnienia nie jest liniowa nawet dla





Rys. 4. Schematy modułu transportowego z uwzględnieniem tylko obszaru autokompresji  
 Fig. 4. Schemes of the transport module taking into account only the autocompression area

przemiany izotermicznej. Dlatego dalsze rozważania należy przeprowadzić dla konkretnego przypadku.

#### 4. Charakterystyka pracy modułu transportowego w procesie wynurzenia.

Dla przyjętego punktu odniesienia EX1504L2 maksymalna głębokość na jaką zanurzył się ROV wyniosła 4824.53 [m]. Ciśnienie zarejestrowane na tej głębokości przyjmuje wartość  $p_H = p_c$  492.14 [bar] a temperatura wody morskiej  $t_c = 1.48$  [°C]. Gęstość azotu dla przyjętego ciśnienia  $p_H$  oraz temperatury  $t_c$  wynosi  $\rho_H = 441.30$  [kg/m<sup>3</sup>] i zakładamy, że jest to wartość, która umożliwi rozpoczęcia procesu transportu urobku przez moduł na powierzchnię. Zmiana wartości gęstości azotu będzie miała oczywiście wpływ na siłę wyporu modułu i tak, gdy wzrośnie rozważany obiekt będzie opadał na dno morskie. Natomiast gdy zmaleje, proces wynurzenia modułu transportowego będzie charakteryzował się zwiększeniem jego prędkości poruszania się ku powierzchni. Tak przyjęte parametry odpowiadające za gęstość azotu w module transportowym będą pierwszym poziomem odniesienia (inaczej punktem startowym, punktem bazowym od którego zaczniemy analizę). Schemat modułu przyjętego do analizy przedstawiono na rys.4. Obszar zajęty przez medium czyli w naszym przypadku azot jest podzielone na dwa równe obszary  $V_{wy}$  oraz  $V_{we}$  a więc  $V_{wy} = V_{we}$ . Na rys.4 umieszczony jest również wzmacniacz ciśnienia, który oznaczony jest współczynnikiem  $\alpha$  a charakteryzujący starty występujące w nim.

W chwili rozpoczęcia procesu wynurzenia ciśnienie w analizowanych obszarach jest równe ciśnieniu zewnętrznemu i wynosi  $p_{wy} = p_{we} = p_H = p_c$ . Analogicznie jest z wartościami gęstości azotu w rozważanych obszarach  $\rho_{wy} = \rho_{we} = \rho_H$ , a co za tym idzie również masy  $m_{wy} = m_{we}$  są sobie równe. W momencie trwania wynurzenia parametry fizyczne charakteryzujące pracę modułu transportowego będą ulegały zmianie. Co zostało zilustrowane na rys.5.

Do analizy przedstawionej na rys.5 założono, że wartość bezwymiarowego współczynnika  $\alpha$  określającego w sposób pośredni straty wewnętrzne wzmacniacza ciśnienia wynosi 0.95. Na osi argumentów naniesiono kroki, dla których analizowano numerycznie wartości fizyczne obrazujące procesy zachodzące podczas autokompresji modułu transportowego przy wykorzystaniu wzmacniacza ciśnienia zdefiniowanego w rozdziale trzecim. Natomiast oś wartości przedstawia udziały procentowe analizowanych wielkości fizycznych. W miarę postępu procesu wynurzenia generuje się różnica między ci-

śnieniem wewnętrznym w obszarze  $V_{we}$  a ciśnieniem otoczenia czyli zewnętrznym. To uruchamia pracę wzmacniacza ciśnienia, który tłoczy medium robocze do obszaru  $V_{wy}$  kosztem zasysanego medium z obszaru  $V_{we}$ , oczywiście część medium roboczego jest uwalniana do otoczenia za pomocą upustu oznaczonego litera E rys.4. Wzrost masy w obszarze  $V_{wy}$  generuje wzrost zarówno ciśnienia  $p_{wy}$  (linia ciągła) jak i gęstości  $\rho_{wy}$  (linia przerywana). Natomiast w obszarze  $V_{we}$  zgodnie z zasadą zachowania masy maleje wartość ciśnienia  $p_{we}$  (linia ciągła) jak również gęstości  $\rho_{we}$  (linia przerywana). W analizowanym przypadku punktem końca procesu jest osiągnięcie powierzchni oraz co jest oczywiste ciśnienie otoczenia osiąga wartość ciśnienia atmosferycznego  $p_{atm}$  oraz  $(p_{wy} - p_{atm}) = 2(p_{atm} - p_{we})$  co jest uwarunkowane równaniem (11). Na wykresie rys.5 przedstawiono również liniami kropkowanymi stosunek całkowitej masy czynnika roboczego zawartego wewnątrz modułu transportowego jakim jest w rozważanym przypadku azot w trakcie procesu wynurzenia  $m_{we} + m_{wy}$  do całkowitej masy w momencie rozpoczęcia wynurzenia  $m_{Hwe} + m_{Hwy}$  dla trzech różnych wariantów objętości  $V_{we}$  i  $V_{wy}$ .

#### 5. Wnioski

W niniejszym artykule skupiliśmy się nad zastosowaniem wzmacniacza ciśnienia do autokompresji. Urządzenie to pracuje autonomicznie jeżeli tylko pojawi się odpowiednia różnica ciśnień między przyłączami WE a tzw. odpowietrzaniem E i nie potrzeba żadnej dodatkowej formy energii do jego zasilania. Dlatego zdaniem autorów jego zastosowanie w transporcie urobku z dna morskiego na powierzchnię otwiera nowe możliwości, które dotychczas wymagały dodatkowego źródła energii. Brak informacji o wewnętrznych stratach ciśnienia analizowanego urządzenia, które jest pomijane przez producentów stwarza problemy natury dokładnego opisu zachodzących procesów w wzmacniaczu ciśnienia. Problem ten rozwiązano definiując bezwymiarowy współczynnik  $\alpha$  (5), który w sposób pośredni informuje o stratach wymienionych w niniejszym artykule. Nadmienić w tym miejscu należy również, co w artykule nie zostało poruszone, że za pomocą tego bezwymiarowego współczynnika możemy również modelować wzmocnienie urządzenia (8) co będzie poruszone w kolejnych artykułach. Autorzy zdają sobie sprawę, że zastosowanie wzmacniacza ciśnienia w niestabilnych warunkach pracy wynikających ze zmiany w procesie wynurzenia różnicy ciśnień między przyłączami WE a tzw. odpowietrzaniem E, może stworzyć sytuację, że tłoczysko może przyjąć pozycje

(9), która uniemożliwi dalszą pracę wzmacniacza mimo dalszego wzrostu różnicy ciśnienia zasilającego urządzenie. Jest to kolejne zagadnienie do dalszej analizy w kolejnych artykułach. Analiza pracy wzmacniacza wydaje się dość skomplikowana ponieważ równanie wyjściowe (2) zależy od położenia tłoczyska a tak naprawdę od wynikającej z tego położenia gęstości medium w analizowanej objętości, a to generuje wartość ciśnienia. Niestety zależność gęstości od ciśnienia nie jest liniowa. Najkorzystniejsze wydaje się analizowanie pracy wzmacniacza ciśnienia wychodząc z zasady zachowania masy. Przesuwający się tłok przy spełnieniu zasady zachowania masy będzie generował zmianę gęstości, która to wartość będzie odpowiedzialna za wartość ciśnienia, które musi spełniać równanie (2). Tą metodę zastosowano do numerycznej analizy pracy wzmacniacza ciśnienia rys. 5. Dodatkowo w tej analizie musimy uwzględnić wartości  $V_{wy}$  i  $V_{we}$ , tworzące wspólną przestrzeń fizyczną ze wzmacniaczem ciśnienia, w której zachodzą interesujące nas procesy. Przeanalizowano pracę rozważanego układu dla trzech różnych wartości  $V_{wy}$  i  $V_{we}$ , co zostało przedstawione na rys. 5 (linia kropkowana). Okazało się że rozkłady zmiany ciśnienia  $p_{wy}/p_H$  oraz  $p_{we}/p_H$  tak naprawdę pokrywają się dla tych trzech przypadków rys. 5 i maksymalna odchyłka w stosunku do krzywej bazowej  $V_{wy}=V_{we}$  (linia ciągła) osiąga maksymalną wartość dla  $n = 30$ , czyli osiągnięcia powierzchni, wynosi w obu przypadkach 0.15 [%]. Podobnie jest w przypadku gęstości. Dla  $V_{we}=0.81)V_{wy}$  maksymalna zmiana  $\rho_{we}$  wynosi 0.11 [%] a dla  $\rho_{wy}$  wynosi 0.07 [%]. Natomiast w przypadku  $V_{we}=1.2)V_{wy}$  maksymalna zmiana  $\rho_{we}$  wynosi 0.07 [%] a dla  $\rho_{wy}$  wynosi 0.11 [%]. Oczywiście w odniesieniu do krzywej bazowej i dla punktu  $n = 30$ . W przypadku upustu masy do otoczenia (krzywe kropkowa-

ne) widzimy na rys.5 znaczne odchylenia od krzywej bazowej. W punkcie  $n = 30$  dla  $V_{we}=0.81)V_{wy}$  wynosi -2.01 [%] czyli zmalała wymiana masy z otoczenie a dla  $V_{we}=1.2)V_{wy}$  wynosi 1.84 [%] czyli wzrosła. W przypadku krzywej bazowej maksymalny upust czyli bezpowrotna strata medium do otoczenia wynosi 5.25 [%] w odniesieniu do całkowitej masy medium roboczego w chwili rozpoczęcia wynurzania. Ta niewielka bezpowrotnie tracona (w analizowanym przypadku) masa w medium transportowym przekłada się na znaczny wzrost ciśnienia w obszarze sprężania oraz znaczący spadek ciśnienia w obszarze rozprężania rys.5. Obszar sprężania w naszym rozumieniu związany jest z akumulacją energii. Natomiast obszar rozprężania posiada jeszcze znaczną energię, którą można jeszcze zagospodarować między innymi do zwiększenia sprężu w objętości  $V_{wy}$ . W niniejszym artykule nie wyjaśniamy już tej kwestii, z uwagi na fakt, że osiągnięte rezultaty w połączeniu z wcześniejszymi koncepcjami transportu urobku ku powierzchni rys.1 spełniają nasze oczekiwania, pozwalając na ich dalsze rozwinięcie.

Na rys.5 naniesiono również zmianę energii jakie zachodzą w rozważanych obszarach  $V_{wy}$  i  $V_{we}$  w przypadku  $V_{wy}=V_{we}$ . Przedstawiono je za pomocą kółek. I tak strata energii  $E_{wy}$  w stosunku do wartości początkowej w momencie rozpoczęcia procesu wynurzania medium transportowego leży powyżej krzywej obrazującej zmiany gęstości  $\rho_{wy}$  (linia przerywana). Natomiast strata energii  $E_{we}$  w stosunku do wartości początkowej obrazują punkty, które prawie pokrywają się z krzywą zmiany gęstości  $\rho_{we}$  (linia przerywana) rys.5. Całkowita strata energii związana z wymianą masy z otoczeniem w rozważanym przypadku wynosi  $E_{str}=3.96$  [%] i jest porównywalna z pozostałymi dwoma analizowanymi wariantami.



## Literatura – References

1. Abramowski T, Kotliński R (2011) Współczesne wyzwania eksploatacji oceanicznych kopalni polimetalicznych. *Górnictwo i geoinżynieria* 35(5):41-61
2. Broda K, Filipek W, Tora B. (2023) Polish Experience in Offshore Mining: The New Concept of Transport Deep-Sea Concretions and Processing; 4GEO, Springer, Springer Nature.
3. Depowski S, Kotliński R, Rühle E, Szamałek K (1998) *Surowce mineralne mórz i oceanów*, Wydawnictwo Naukowe Scholar, Warszawa
4. Filipek W, Broda K. Theoretical foundation of the implementation of controlled pyrotechnical reactions as an energy source for transportation from the sea bed. *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin* 48 (120) 2016, pg. 117-124
5. Filipek W, Broda K. Experimental verification of the concept of the use of controlled pyrotechnic reaction as a source of energy as a part of the transport system from the seabed, *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*, 49 (121) 2017, 77-83.
6. Filipek W, Broda K. (2017), The Theoretical Basis of the Concept of Using the Controlled Pyrotechnical Reaction Method as an Energy Source in Transportation from the Sea Bed, *TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol.11, No. 4, 653-659.
7. Filipek W, Broda K. (2017), Research on the Application of Controlled Pyrotechnic Reaction with the Use of Ammonium Nitrate for Transport from Seabed, *TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol.11, No. 4, 647-652.
8. Filipek W, Broda K. (2018) Theoretical research on the gas phase density change in processes occurring during work of the transport module intended for transport from the seabed / W: *Proceedings of the international conference on Human safety in work environment : operating machinery and equipment : integrated management systems: quality - environment - safety - technology : October 23–27, 2018, Gdańsk-Nynashamn-Stockholm-Tallinn-Stockholm-Nynashamn-Gdańsk*. — Warszawa : STE Group Sp. z o.o., 2018. — (New Trends in Production Engineering ; ISSN 2545-2843 ; vol. 1 iss. 1). — ISBN: 978-83-952420-0-7. — S. 597–604. — Bibliogr. s. 603–604, Abstr.
9. Filipek W, Broda K. (2018) Theoretical research on the stability of the transport module intended for transport from the seabed / W: *Proceedings of the international conference on Human safety in work environment : operating machinery and equipment : integrated management systems: quality - environment - safety - technology : October 23–27, 2018, Gdańsk-Nynashamn-Stockholm-Tallinn-Stockholm-Nynashamn-Gdańsk*. — Warszawa : STE Group Sp. z o.o., 2018. — (New Trends in Production Engineering ; ISSN 2545-2843 ; vol. 1 iss. 1). — ISBN: 978-83-952420-0-7. — S. 605–612. — Bibliogr. s. 611–612, Abstr.
10. Filipek W, Broda K. (2018) Experimental research on the concept of using an autonomous transport module for transport from the seabed / // W: *Proceedings of the international conference on Human safety in work environment : operating machinery and equipment : integrated management systems: quality - environment - safety - technology : October 23–27, 2018, Gdańsk-Nynashamn-Stockholm-Tallinn-Stockholm-Nynashamn-Gdańsk*. — Warszawa : STE Group Sp. z o.o., 2018. — (New Trends in Production Engineering ; ISSN 2545-2843 ; vol. 1 iss. 1). — ISBN: 978-83-952420-0-7. — S. 267–275. — Bibliogr. s. 274–275, Abstr.
11. Filipek W, Broda K. (2018) Research on the concept of using calcium carbide as a source of energy for transport from the seabed / W: *Proceedings of the international conference on Human safety in work environment : operating machinery and equipment : integrated management systems: quality - environment - safety - technology : October 23–27, 2018, Gdańsk-Nynashamn-Stockholm-Tallinn-Stockholm-Nynashamn-Gdańsk*. — Warszawa : STE Group Sp. z o.o., 2018. — (New Trends in Production Engineering ; ISSN 2545-2843 ; vol. 1 iss. 1). — ISBN: 978-83-952420-0-7. — S. 277–284. — Bibliogr. s. 284, Abstr.
12. Filipek W, Broda K. (2019) Theoretical research on mass exchange between an autonomous transport module and the environment in the process of transport from the seabed / W: *Advances in marine navigation and safety of sea transportation / eds. Adam Weintrit, Tomasz Neumann*. — Boca Raton [etc.] : CRC Press/Balkema : Taylor & Francis Group, cop. 2019. — Publikacja zawiera materiały z: *TransNav 2019 : 13th international conference on Marine navigation and safety of sea transportation : 12–14 June 2019, Gdynia, Poland*. — ISBN: 978-0-367-35760-3 ; e-ISBN: 978-0-429-34193-9. — S. 143–149. — Bibliogr. s. 148–149, Abstr.. — Abstrakt w: *TransNav 2019 : abstracts of papers presented during the 13<sup>th</sup> international conference on Marine navigation and safety of sea transportation : Gdynia, 12–14 June 2019 / eds. Adam Weintrit, Tomasz Neumann*. — [Gdynia : s.n.], [2019]. — S. 71
13. Jones DO, Durden JM, Murphy K, Gjerde K, Gebicka A, Colaço A, Morato T, Cuvelier D, (2019) Existing environmental management approaches relevant to deep-sea mining. *Mar Polic* 103:172-181
14. Niedoba T (2015) Polymetallic concretions: long-range source of mineral raw materials. *Inżynieria Mineralna* 1(35):61–74
15. Roberson J.A., Crowe C.T., (1995) *Engineering Fluid Mechanics*, John Wiley & Sons, Inc.
16. Roberson J.A., Cassidy J.J, Chaudhry M.H., (1995) *Hydraulic Engineering* John Wiley & Sons, Inc.

17. Sharma R., (2017) Deep-sea mining: resource potential, technical and environmental considerations. Springer International Publishing AG,
18. SPC (2013) Deep sea minerals: sea-floor massive sulphides. A physical, biological, environmental, and technical review. In: Baker E, Beaudoin Y (Eds.), Vol. 1A, Secretariat of the Pacific Community, Sydney
19. The Royal Society (2017) Future ocean resources [<https://royalsociety.org/~media/policy/projects/future-oceans-resources/future-of-oceans-evidence-pack.pdf>]
20. Walden H., Stasiak J., (1971) Mechanika cieczy i gazów w inżynierii sanitarnej. Wydawnictwo Arkady. Warszawa.

### *Autocompression as a Method of Accumulating Waste Energy during the Emergence of an Autonomous Transport Module using a Change in Buoyancy*

*Despite the Covid-19 pandemic lasting for few years, the interest in the exploitation of deposits lying at the bottom of seas and oceans at great depths has not been waning. Many new concepts for the exploitation of sea deposits have been developed. Many consortia were established, interested in mining activities in seas and oceans. And although the most advanced venture of Nautilus-Minerals has not been successful so far, it has made a huge leap forward in terms of research and technology. The exploitation on an industrial scale is most likely to start in the coming years, especially in the waters of the EEZ (Exclusive Economic Zone). Recently, for example, the Cook Islands authorities have granted three licenses for this type of activity. In international waters though, we must, unfortunately, still wait for legal solutions satisfying all interested parties. The exploitation of shelf deposits is successfully being carried out with various methods in many regions around the world (Karlic, 1984; Depowski et al., 1998; Abramowski, Kotliński, 2011; Niedoba 2015, SPC 2013; Sharma, 2017); however, reaching for deposits of massive polymetallic sulphides or polymetallic nodules lying at great depths places considerable demands on scientists and engineers. Among the heaviest ones is the development of a method of transporting spoil from the bottom to the sea surface. For several years, the authors have been conducting theoretical and experimental research on new concepts of transport from the seabed, the results of which were presented in numerous publications (Filipek W., Broda K.: 2016, 2017, 2018, 2019, Broda, Filipek, Tora 2023).*

*While considering various concepts of transport from the seabed using an autonomous module, we paid attention to energy losses during the exchange of the working medium between the autonomous transport module and the surroundings (sea water). In the articles (Filipek W., Broda K. 2018, 2019) we focused on the positive aspect of this exchange, but nevertheless these are energy losses. In this publication, the authors analyze what part of this energy can be used (in autocompression) and what impact it has on the energy balance of the transport module.*

**Keywords:** *marine mining, transport from great depths, autonomous transport module*