

WPŁYW KONFIGURACJI INSTALACJI TRANSPORTU PNEUMATYCZNEGO PALIWA STAŁEGO DO KOTŁA OKRĘTOWEGO NA OPORY PRZEPEŁYWU

THE INFLUENCE OF CONFIGURATION OF PNEUMATIC TRANSPORT INSTALLATION OF SOLID FUEL ON FLOW RESISTANCE

Daniel Łuszczynski*, Wojciech Zeńczak

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, al. Piastów 17, 70-310
Szczecin, Wydział Techniki Morskiej i Transportu, e-mail: d.luszczynski@zu

* Adres do korespondencji/Corresponding author

Streszczenie: W artykule omówiono ogólne wymagania dotyczące pneumatycznej instalacji transportu paliwa stałego na statkach. Porównano trzy wybrane rozwiązania tych instalacji na trzech rodzajach statków. Zaprezentowano wybrane wyniki badań dla czterech różnych konfiguracji instalacji. Omówiono także wpływ zmiany konfiguracji instalacji w warunkach laboratoryjnych na spadki ciśnienia w rurociągu podczas transportu mieszaniny dwufazowej.

Słowa kluczowe: siłownie okrętowe, transport pneumatyczny, instalacja transportu paliwa, paliwo stałe.

Abstract: The article discusses general requirements for pneumatic solid fuel transport installations on ships. Three selected solutions of these installations on three types of vessels were compared. Selected test results for four different plant configurations were presented. The influence of changing the system configuration in laboratory conditions on pressure drops in the pipeline during the transport of a two-phase mixture was also discussed.

Keywords: ship power plants, pneumatic transport, fuel transport installation, solid fuel.

1. WSTĘP

Zagadnienie transportu paliwa stałego na statkach rozpatrywano m.in. w publikacjach autorów [Łuszczynski i Zeńczak 2016a, b]. Scharakteryzowano w nich model matematyczny służący do opisu spadku ciśnienia mieszaniny gaz-ciało stałe, opisano plan badań eksperymentalnych oraz zaprezentowano przykładowe rozwiązania instalacji transportu pneumatycznego paliwa stałego na statkach. Opisano też stanowisko badawcze oraz omówiono wyniki badań dla jednej z konfiguracji

instalacji. Zmiana długości rurociągu, jej średnicy, jak i jego geometrii oraz liczba użytych kolan mają wpływ na wielkość oporów przepływu mieszaniny dwufazowej. Podczas przeprowadzanych badań laboratoryjnych, które miały na celu określenie wpływu ruchu statku na fali na spadek ciśnienia w rurociągu transportowym, w którym transportowana była mieszanina dwufazowa gaz-ciało stałe, zmieniana była konfiguracja rurociągu transportowego. W wyniku tego procesu możliwe było określenie spadku ciśnienia w zależności od konfiguracji rurociągu.

Niewielka liczba publikacji, dotycząca wpływu zmiany geometrii rurociągu na spadki ciśnienia podczas transportu pneumatycznego mieszaniny gaz-ciało stałe, dla różnych materiałów ziarnistych, potwierdza celowość podjęcia tego typu badań. Celem niniejszego artykułu jest zaprezentowanie wyników pomiarów, przeprowadzonych na stanowisku badawczym będącym w ustalonej pozycji, które pozwoliły na określenie zależności spadku ciśnienia od zmiany strumienia masy materiału ziarnistego i konfiguracji rurociągu. Pomiarzy przeprowadzono dla trzech rodzajów materiałów ziarnistych, przy czterech różnych konfiguracjach stanowiska badawczego, przy stałej średnicy rurociągu.

2. PRZYKŁADY ROZWIĄZAŃ INSTALACJI TRANSPORTU PALIWA STAŁEGO

Rozpatrując możliwe rozwiązania pneumatycznej instalacji transportu paliwa stałego, np. pelletu na statkach, należy wziąć pod uwagę fakt, że instalacja powinna spełniać dodatkowe kryteria niezawodności i bezpieczeństwa. Sama instalacja musi spełniać bezwzględny wymóg szczelności, powinna być zamontowana sztywno i nie może ulegać żadnym odkształceniom – tym samym jej elementy muszą być sztywno zamontowane do wewnętrznych elementów konstrukcyjnych statku.

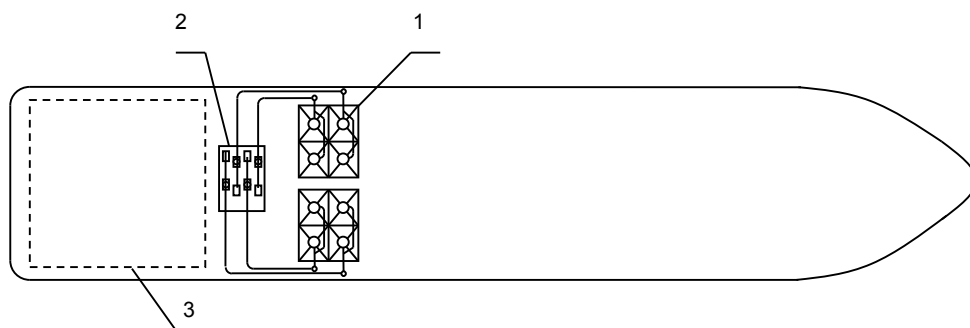
Poszczególne elementy instalacji muszą przechodzić okresowe przeglądy techniczne. Na przykład grubość ścianek rurociągów musi być systematycznie sprawdzana, aby uniknąć przedziurawienia kolan rurociągu. Innymi ważnymi elementami instalacji, które również muszą spełniać najwyższe wymagania niezawodności, są podajniki ciśnieniowe. Instalacja musi być także odporna na drgania, powstające w wyniku pracy śruby napędowej, przenoszone na elementy konstrukcyjne statku i instalacji transportu. Niezbędne wyposażenie instalacji ze względów bezpieczeństwa przeciwpożarowego stanowią odpylacze, zapobiegające niebezpieczeństwu wybuchu pyłów powstających podczas transportu paliwa stałego do zasobni dziennej [Dmowski 1967; Dolny 1997].

Aby zapewnić ciągły i niezawodny transport paliwa z zasobni głównych do zasobni dziennych, paliwo transportowane jest zwykle kilkoma rurociągami. Innym aspektem, podkreślającym niezawodność transportową paliwa stałego, jest utrzymanie wymaganego ciśnienia w instalacji transportowej, co wiąże się z parametrami konstrukcyjnymi rurociągów, takimi jak średnica oraz długość rurociągu.

Średnica rurociągu, jak i maksymalna długość rurociągu, muszą być odpowiednio dobrane. Analizy porównawcze spadku ciśnienia w zależności od długości rurociągu oraz jego układu na statku dla zrealizowanych projektów są nieznanne.

Przykładowo dla statku typu masowiec o nośności 33 000 DWT, w którym główne zasobnie paliwa stałego były umieszczone po obu stronach burty przed nadbudówką, w niedużym oddaleniu od zasobni dziennej, paliwo stałe miało być transportowane na odległość 24,3 m rurociągami o średnicy 116 mm. [US Department of Transportation 1982].

Schemat tej instalacji przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat instalacji transportu pneumatycznego paliwa stałego z zasobni umieszczonej przed nadbudówką: 1 – zasobnie główne, 2 – zasobnia dzienna, 3 – zarys nadbudówki

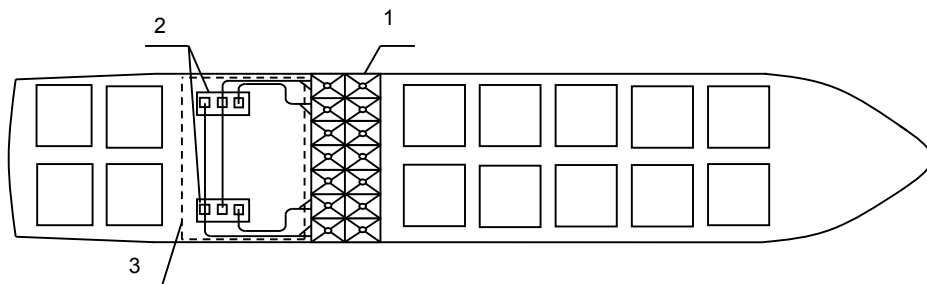
Fig. 1. Diagram of a pneumatic solid fuel transport installation from the storage located in front of the superstructure: 1 – main storage, 2 – daily storage, 3 – outline of the superstructure

Źródło: [US Department of Transportation 1982].

Druga przykładowa instalacja zaplanowana dla kontenerowca charakteryzowała się tym, że główne zasobnie węgla również były umieszczone w niewielkim oddaleniu przed nadbudówką.

Węgiel był transportowany z zasobni głównej na odległość 39 m rurociągami o średnicy 101 mm [US Department of Transportation 1982].

Schemat tej instalacji przedstawia rysunek 2.



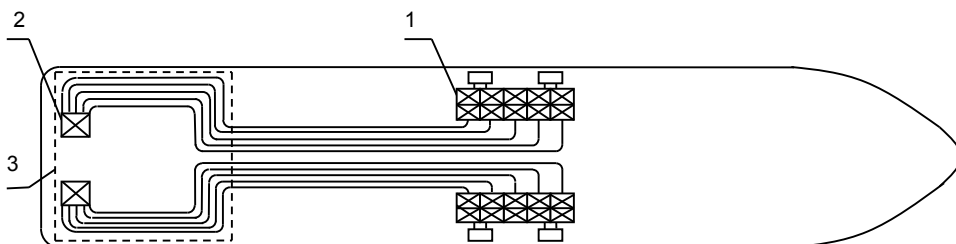
Rys. 2. Schemat instalacji transportu pneumatycznego paliwa stałego z zasobni umieszczonej przed nadbudówką; 1 – zasobnie główne, 2 – zasobnia dzienna, 3 – zarys nadbudówki

Fig. 2. Diagram of a pneumatic solid fuel transport installation from the storage located in front of the superstructure; 1 – main storage, 2 – daily storage, 3 – outline of the superstructure

Źródło: [US Department of Transportation 1982].

Trzecia przykładowa instalacja przewidziana była dla tankowca o nośności 75 000 DWT. Główne zasobnie węgla umieszczone były na śródokręciu, z których paliwo stałe, w tym przypadku węgiel, miało być transportowane do 10 zasobni dziennych umieszczonych na rufie statku za nadbudówką. Węgiel miał być transportowany rurociągami o średnicy 127 mm, na odległość 127 m [US Department of Transportation 1982].

Schemat tej instalacji przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Schemat instalacji transportu pneumatycznego paliwa stałego z zasobni umieszczonej na śródokręciu; 1 – zasobnie główne, 2 – zasobnia dzienna, 3 – zarys nadbudówki

Fig. 3. Diagram of a pneumatic solid fuel transport installation from the storage located in midships; 1 – main storage, 2 – daily storage, 3 – outline of the superstructure

Źródło: [US Department of Transportation 1982].

Jak widać na przedstawionych schematach w zależności od rodzaju statku, jego zasięgu oraz przewożonego ładunku, proponowane były różne konfiguracje pneumatycznej instalacji transportu. Zasobnie dzienne i główne miały inne rozmieszczenie i pojemność, długości rurociągów były znacznie zróżnicowane, natomiast ich średnice były zbliżone.

Istotnym elementem konstrukcyjnym przedstawionych instalacji, czego nie pokazano na schematach, była wysokość, na jaką paliwo stałe musiało zostać przetransportowane. Podczas ruchu statku na fali opory przepływu będą inne w każdym przypadku ze względu na dodatkowe siły działające na ziarna podczas transportu.

3. WYNIKI BADAŃ

Wyniki pomiarów pierwszego etapu badań, przeprowadzanych na stanowisku z nieruchomą platformą [Łuszczynski i Zeńczak 2016a], miały na celu określenie zależności spadku ciśnienia od masy dawki transportowanego materiału dla trzech materiałów ziarnistych przy czterech różnych konfiguracjach instalacji.

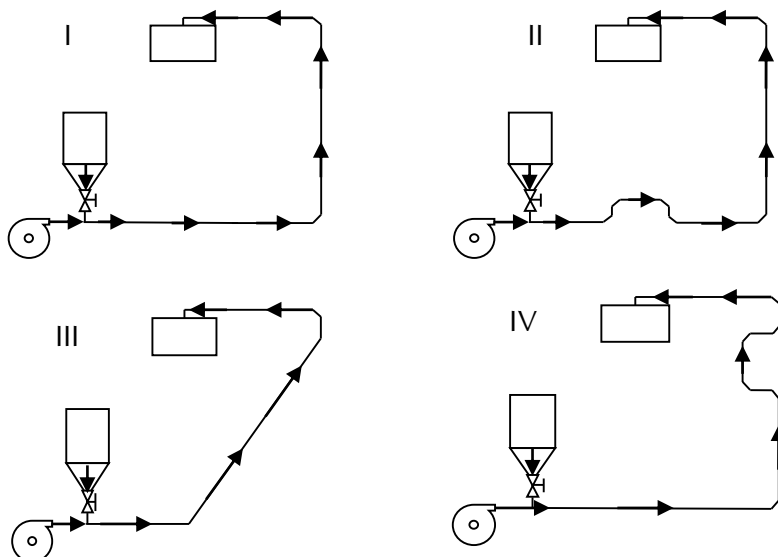
Badano zależność $\Delta p = f(l, m)$, przy czym

$$l, m = \text{var}, \quad \left. \begin{array}{l} t_p \\ w_p \\ \alpha \end{array} \right\} = \text{const},$$

gdzie:

- l – długość rurociągu,
- m – masa materiału ziarnistego, który podlegał przetransportowaniu,
- t_p – temperatura powietrza,
- w_p – prędkość przepływu powietrza,
- α – kąt przechyłu platformy.

Cztery konfiguracje badanych instalacji transportowych przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Schematy instalacji transportu paliwa stałego wykorzystywane podczas przeprowadzanych badań

Fig. 4. Schemes of solid fuel transport installations used during research

Źródło: opracowanie własne.

Najistotniejsze parametry badanych instalacji transportu przedstawia tabela 1.

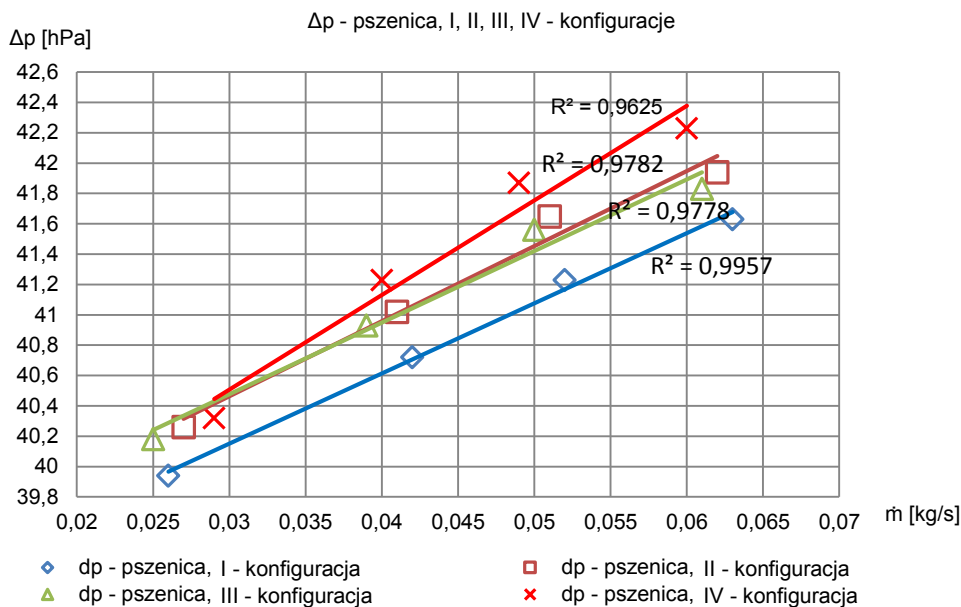
Tabela 1. Dane geometryczne poszczególnych konfiguracji

Table 1. Geometric data of individual configurations

Konfiguracja	Długość [m]	Liczba kolan	Średnica wewnętrzna [m]
I	5,74	6	0,02
II	6,15	14	0,02
III	5,24	6	0,02
IV	6,55	14	0,02

Źródło: opracowanie własne.

Wyniki serii pomiarów na stanowisku z nieruchomą platformą, mających na celu określenie zależności spadku ciśnienia od zmiany masy transportowanego materiału ziarnistego, dla czterech różnych konfiguracji stanowiska, dla jednego materiału ziarnistego, przedstawia rysunek 5. Badania realizowano w tym przypadku z użyciem ziaren pszenicy zamiast pelletu ze względu na mniejsze wymiary instalacji.



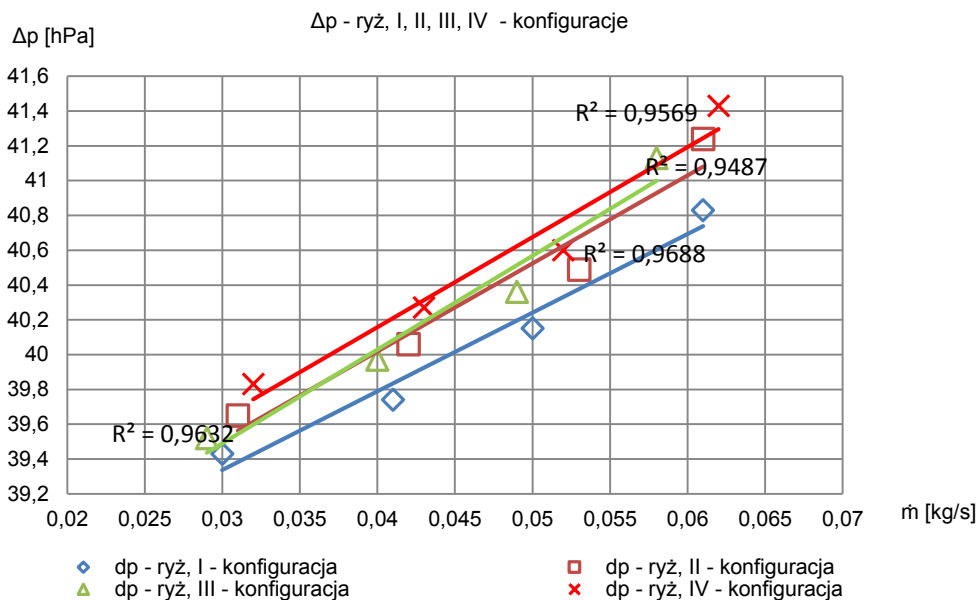
Rys. 5. Spadek ciśnienia w zależności od zmiany strumienia masy materiału ziarnistego (ziarna pszenicy) dla czterech różnych konfiguracji

Fig. 5. Pressure drop depending on the change of mass flow of granular material (wheat grains) for four different configurations

Źródło: opracowanie własne.

Na wykresie, przedstawionym na rysunku 5, można zauważyć, że największe spadki ciśnienia zostały odnotowane dla pszenicy, w czwartej konfiguracji stanowiska. Takie spadki ciśnienia spowodowane były tym, że czwarta konfiguracja w odcinku pionowym składa się z większej liczby kolan niż pozostałe konfiguracje. W każdym przypadku opory przepływu rosły wraz ze wzrostem strumienia masy materiału ziarnistego.

Następna seria pomiarów na stanowisku z nieruchomą platformą miała na celu określenie zależności spadku ciśnienia od zmiany masy dawki paliwa, również dla czterech różnych konfiguracji stanowiska, lecz dla innego materiału ziarnistego, w tym przypadku dla ryżu. Zależność tę przedstawia rysunek 6.



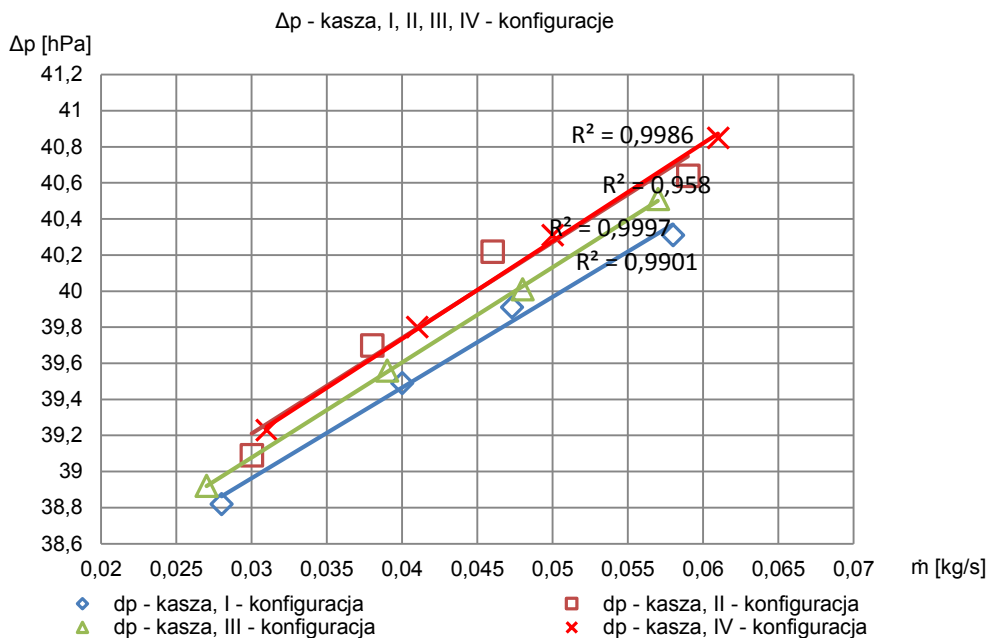
Rys. 6. Spadek ciśnienia w zależności od zmiany strumienia masy materiału ziarnistego (ryżu) dla czterech różnych konfiguracji

Fig. 6. Pressure drop depending on the change of mass flow of granular material (rice) for four different configurations

Źródło: opracowanie własne.

Jak wynika z rysunku 6, otrzymane wyniki reprezentujące spadki ciśnienia, spowodowane zwiększeniem masy dawki transportowanego paliwa, w tym przypadku ryżu, dla czterech różnych konfiguracji, potwierdzają charakter zmian, jakie uzyskano dla pszenicy. Wartości spadków ciśnienia dla transportowanego materiału, którym był ryż, w wartościach liczbowych są nieco mniejsze niż dla pszenicy z tego względu, iż pszenica charakteryzuje się większą gęstością nasypową od ryżu.

Kolejna seria pomiarów na stanowisku z nieruchomą platformą miała na celu określenie zależności spadku ciśnienia od zmiany masy dawki paliwa, także dla czterech różnych konfiguracji stanowiska, dla trzeciego materiału ziarnistego, tj. ziaren kaszy. Zależność tę przedstawia rysunek 7.



Rys. 7. Spadek ciśnienia w zależności od zmiany strumienia masy materiału ziarnistego (kaszy) dla czterech różnych konfiguracji

Fig. 7. Pressure drop depending on the change of mass flow of granular material (cereal) for four different configurations

Źródło: opracowanie własne.

Dla materiału ziarnistego, jakim była kasza, można zauważyć, że w porównaniu do pozostałych materiałów spadki ciśnienia były najmniejsze, a zmiana konfiguracji instalacji, jak w poprzednich przypadkach, ma podobny wpływ na zmiany oporów przepływu. Najmniejsze spadki ciśnienia otrzymane podczas transportu kaszy spowodowane są tym, że kasza posiada najmniejszą gęstość nasypaną.

Porównując wszystkie przeprowadzone pomiary na stanowisku z nieruchomą platformą, które miały na celu określenie zależności spadku ciśnienia od zmiany strumienia masy materiału, dla trzech materiałów ziarnistych, można zaobserwować, że dla czwartej konfiguracji spadki ciśnienia były największe.

Przy małych wartościach strumienia masy, tj. przy pierwszej pozycji otwarcia zaworu o kąt $\beta = 72\%$ (od kąta otwarcia zależy strumień masy materiału), spadki ciśnienia dla wszystkich konfiguracji były do siebie zbliżone.

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie danych literaturowych dotyczących projektów instalacji można wysnuć wniosek, iż istniały różne konfiguracje instalacji transportu paliwa stałego, jakim był węgiel. W zależności od typu statku instalacje różniły się geometrią, kątami pochyleń rurociągów, długością rurociągu, średnicą rurociągu, liczbą wykorzystanych kolan, pojemnością zasobni głównych i dziennych oraz wysokością, na jaką należało przetransportować paliwo stałe.

Jak wiadomo, długość instalacji transportowej ma zasadniczy wpływ na opory przepływu w rurociągu. W związku z tym, aby opory przepływu w rurociągu były jak najmniejsze, odległość transportowa powinna być możliwie jak najmniejsza, więc zasobnie główne paliwa stałego powinny być umieszczone możliwie przed nadbudówką lub na śródkręciu.

Projekty pneumatycznej instalacji transportu, które przewidywały umieszczenie zasobni głównych paliwa stałego w części dziobowej statku były rzadko realizowane, ze względu na dużą odległość transportową. Powodowało to wzrost oporów przepływu, a co za tym idzie, zwiększenie zużycia energii potrzebnej do utrzymania optymalnych parametrów przepływu, efektem czego było zwiększone zużycie paliwa.

Pomiar spadków ciśnienia, spowodowany różnicą w długości rurociągów, był jednym z etapów badań eksperymentalnych. Dla czterech konfiguracji o różnych długościach, innej liczbie kolan oraz kącie nachylenia odcinka pionowego rurociągu wartości spadków ciśnień były zbliżone.

Największy spadek ciśnienia został zaobserwowany dla czwartej konfiguracji, a najmniejszy – dla pierwszej i trzeciej. Podczas badania wpływu zmiany konfiguracji rurociągu na spadki ciśnienia była również badana zależność spadku ciśnienia od zmiany strumienia masy transportowanego materiału ziarnistego. Na podstawie zaobserwowanych zmian, spowodowanych zmianą konfiguracji instalacji, można stwierdzić, że zwiększenie długości rurociągu o 1,21 m w stosunku do trzeciej najkrótszej konfiguracji nie powodowało znacznych różnic w spadkach ciśnień w instalacji. Większe zmiany długości instalacji były ograniczone możliwościami stanowiska. Zauważalne zmiany struktury przepływu w czwartej konfiguracji miały miejsce w odcinku pionowym rurociągu, były one wynikiem zastosowania w tej części rurociągu większej liczby kolan niż w odcinku poziomym.

Otrzymane wyniki pozwalają lepiej zrozumieć specyfikę spadków ciśnień wywołanych zmianą oporów liniowych, jak również zmianą oporów miejscowych. Poza tym dodatkowym czynnikiem, wpływającym na opory przepływu, jest złożoność ruchów, jakie wykonuje statek na fali. Dla pełnego obrazu zagadnienia niezbędne są dodatkowe badania, uwzględniające taki ruch platformy.

LITERATURA

- Dmowski, A., 1967, *Transport pneumatyczny w młynarstwie*, WPLiS, Warszawa.
- Dolny, S., 1997, *Transport pneumatyczny i odpylanie w przemyśle drzewnym*, Wydawnictwo Akademii Rolniczej im. Augusta Cieszkowskiego w Poznaniu, Poznań.
- Łuszczynski, D., Zeńczak, W., 2016a, *Preliminary Results of Experimental Investigations of Transporting Pneumatic Solid Fuel to a Ship's Boiler*, w: Matuszak, Z. (ed.), *Selected Problems of Operation of Ship Power Plants*, Akademia Morska w Szczecinie, Szczecin.
- Łuszczynski, D., Zeńczak, W., 2016b, *Selection of Mathematical Model to Describe Solid Fuel Pneumatic Transport to the Ship Boiler*, *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*, vol. 48, no. 120, s. 22–28.
- US Department of Transportation, 1982, Maritime Administration, Report MA-RD-920-82057, *Pneumatic Dense-Phase Shipboard Coal and Ash Conveying Storage and Bunkering Systems for Coal-Fired-Ships. Technical Applications Manual*, <https://pl.scribd.com/document/100521329/Q-Pneumatic-Transfer-of-Coal-on-Board-Macawber-Engineering-1980>.