

Model instalacji do transportu materiałów erozyjnych i korozyjnych

Tadeusz Mączka, Bartłomiej Borkowski

1. Wstęp

Podczas transportu hydraulicznego czy pneumatycznego elementy instalacji transportujących narażone są na niekorzystne i niemożliwe do całkowitego wyeliminowania zjawiska erozyjne, a czasem działające w synergii zjawiska korozyjne. W celu ograniczenia tych zjawisk stosuje się: odpowiednie zaprojektowanie instalacji, właściwy dobór materiałów konstrukcyjnych i materiałów na system ochrony oraz odpowiedni dobór technologii jej wykonania.

Pomimo optymalnego zaprojektowania instalacji, właściwego doboru materiałów, w tym doboru odpowiedniej technologii wykonania, ważna jest również właściwa eksploatacja obiektu, prowadzona zgodnie z instrukcją ruchową. Ponadto, szczególnie dla nowych obiektów, bardzo ważne jest monitorowanie i diagnostyka poszczególnych elementów instalacji. W celu uniknięcia awarii ważne jest odpowiednio wczesne wykrywanie uszkodzeń lub ich predykcja na podstawie wykonanych badań.

Dla przemysłowych instalacji, w szczególności energetycznych, ocena stanu technicznego instalacji do transportu materiałów erozyjnych i korozyjnych jest bardzo utrudniona, a czasami wręcz niemożliwa. Wynika to przede wszystkim z trudnego dostępu do instalacji, wielowarstwowej budowy systemu rurociągów (wyłożenia metal – beton, metal – ceramika, metal – guma itp.), wysokich temperatur, nieprzyjemnego otoczenia, niemożności inspekcji wewnątrz rurociągów, cyklonów i pomp (szczególnie podczas pracy takiej instalacji). Weryfikacja stanu technicznego obiektów narażonych na uszkodzenia jest niezwykle istotna ze względu na straty finansowe w przypadku wystąpienia nagłej awarii.

W pracy badawczo-rozwojowej realizowanej w Instytucie Automatyki Systemów Energetycznych, w pierwszej jej fazie, budowane jest stanowisko badawcze odwzorowujące przemysłową instalację do transportu hydraulicznego medium dwufazowego. Będzie ono wykorzystywane podczas opracowywania zautomatyzowanego systemu NDT do diagnostyki stanu technicznego instalacji transportujących materiały erozyjne.

Do metod diagnostycznych, które mogą być stosowane podczas pracy obiektów oraz nie wpływają w znaczący sposób na funkcje badanego obiektu, należą metody nieniszczące (NDT – *Non Destructive Testing*). Na rys. 1 został przedstawiony ogólny podział tych metod.

Na podstawie przeprowadzonych studiów literaturowych i analizy przyszłych wymagań stawianych opracowywanemu zautomatyzowanemu systemowi NDT wybrano metody ultradźwiękowe (UT). Zaletą tych metod jest możliwość wykonywania diagnostyki podczas pracy obiektów, bez bezpośredniego

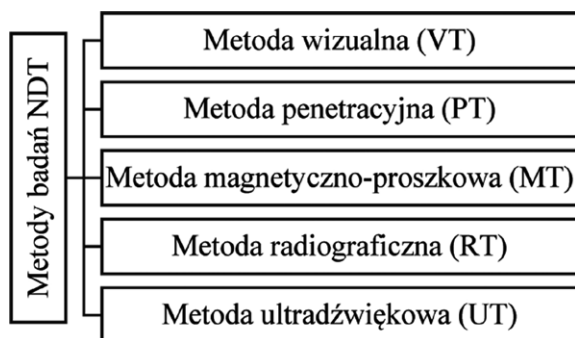
Streszczenie: W artykule przedstawiono koncepcję oraz wstępny projekt modelu stanowiska do transportu materiałów erozyjnych i korozyjnych. Wykonano próbę analitycznego wyznaczania parametrów przepływowych dla modelu instalacji podczas transportu hydraulicznego dwufazowego medium erozyjnego (woda+ścierniwo SiC). Następnie wykonano wstępne modelowanie instalacji w środowisku Matlab & Simulink. Głównym przeznaczeniem stanowiska jest testowanie w warunkach laboratoryjnych zautomatyzowanego systemu NDT do diagnostyki stanu technicznego instalacji transportującej materiały erozyjne (pomiar grubości warstwy ochronnej, wykrywanie defektów na etapie produkcji i eksploatacji, prognozowanie trwałości). Ponadto stanowisko można wykorzystać do badania odporności erozyjnej i korozyjnej różnych wyłożeń (gumy, poliuretany, kompozyty i betony trudno ścieralne, bazalt i inne) stosowanych do zabezpieczenia instalacji: rurociągów transportujących popioły i żuźle, pyłoprzewodów w elektrowniach, zakładów wzbogacania rud, w kopalniach i transportujących różnego rodzaju kruszywa itp.

Słowa kluczowe: model instalacji, badania NDT, materiały erozyjne i korozyjne, analiza numeryczna

INSTALLATION MODEL FOR TRANSPORTING EROSION AND CORROSIVE MATERIALS

Abstract: The article presents the concept and initial project of the model for the transport of erosive and corrosive materials. An analytical calculations were carried out to determine flow parameters of the installation model during hydraulic transport of a two-phase erosive medium (water + SiC abrasive). Next, the initial modeling of the installation was carried out in the Matlab & Simulink environment. The main purpose of the test stand is to test in the laboratory conditions the automated NDT system for diagnostics the technical condition of the installation transporting erosive materials (measurement of protective layer thickness, detection of defects at the production and exploitation stage, forecasting durability). In addition, the test stand can be used to carry out the erosion and corrosion resistance tests of various linings (rubber, polyurethanes, composites and abrasive cement, basalt and others) used to protect installations: pipelines transporting ashes and slags, dust ducts in power plants, ore enrichment plants, mines, and transporting various types of aggregates, etc.

Keywords: installation model, NDT testing, erosive and corrosive materials, numerical analysis



Rys. 1. Podstawowy podział metod NDT wg [1]

wpływania na ich funkcje ruchowe. Na etapie prac wstępnych sprawdzono, że opracowywany ultradźwiękowy system NDT może służyć do diagnostyki wielowarstwowych instalacji (np. metal – wyłożenie kompozytowe) lub wykrywania na etapie produkcyjnym wad technologicznych (np. rozwarstwień, pęknięć, wtrącin gazowych w kompozytowym wyłożeniu).

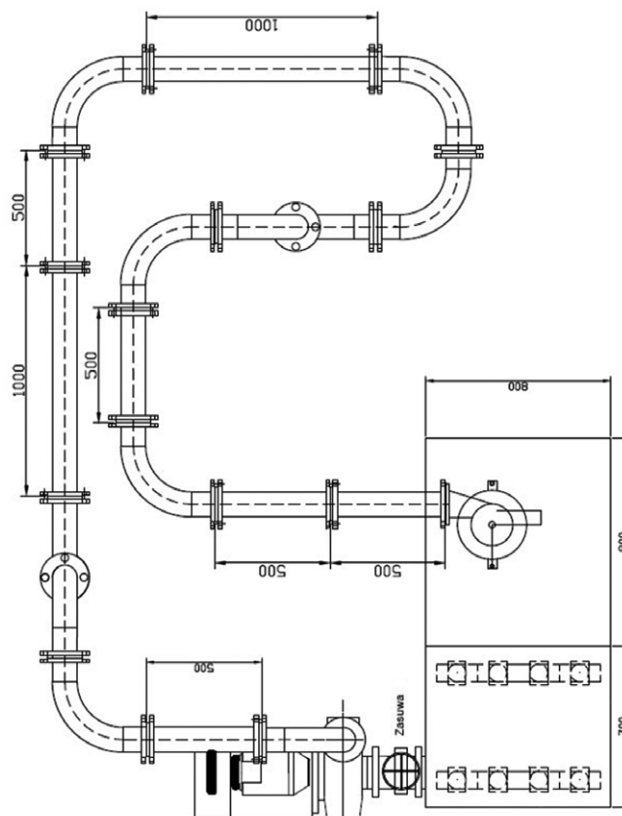
2. Stanowisko badawcze

Jak wspomniano, opracowywane stanowisko ma odwzorowywać elementy występujące w instalacji przemysłowej do transportu hydraulicznego (pompa, odcinki proste, kolana, hydrocyklon, zbiornik buforowy, przelew) rozdrobionych cząstek materiału erozyjnego (frakcja ścierniwa o cząstkach do 3 mm transportowana w wodzie). Założono, że gęstość transportowanego medium (np. mieszanina wody z: piaskiem, popiołem, żużłem, ścierniwem SiC) będzie zawierała się w przedziale 1100–2000 kg/m³. Podstawowym i najważniejszym elementem instalacji jest pompa z możliwością płynnej regulacji prędkości obrotowej (regulacja wydatku), przystosowana do transportu materiałów trudno ścieralnych. Jak wspomniano, właściwa instalacja transportująca składa się z rur stalowych (o początkowym prześwicie roboczym ok. 60 mm), kolan, zasuw nożowych. Instalację rurową zespolono z hydrocyklonem, z którego medium wypływa do zbiornika buforowego przez dyszę wylewową. Pod dyszą przewidziano montaż próbek do dodatkowego badania odporności erozyjnej. Zbiornik wyposażono w instalację do mieszania transportowanego medium (pulpy). Należy zaznaczyć, że projekt uwzględnia wyłożenie wszystkich powierzchni roboczych instalacji materiałem trudno ścieralnym (w pierwszym podejściu elastomer, trudnościeralna guma/poliuretan). Wstępny projekt stanowiska (model instalacji do transportu materiałów erozyjnych) prezentuje rys. 2.

3. Podstawowe dane i zależności służące do symulacji i weryfikacji parametrów ruchowych modelu instalacji

3.1. Obliczenia analityczne

Podczas projektowania modelu instalacji (odwzorowującej obiekt rzeczywisty) do obliczeń analitycznych wykorzystano zależności i dane zawarte w pracach [2, 3]. W tabeli 1 zostały



Rys. 2. Schemat modelu instalacji do transportu materiałów erozyjnych

Tabela 1. Dane projektowe wykorzystane do weryfikacji obliczeń symulacyjnych

Natężenie przepływu	$Q = 0,25 \text{ m}^3/\text{s}$
Długość instalacji	$l = 7000 \text{ m}$
Średnica umowna instalacji	$d = 0,40 \text{ m}$
Gęstość cieczy	$\delta = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$
Dynamiczny współczynnik lepkości	$\eta = 0,89 \text{ mPa} \cdot \text{s}$
Kinematyczny współczynnik lepkości	$\nu = 0,89 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Opory miejscowe dla 2 kolan segmentowych 45°	$\xi = 2 \cdot 0,32 = 0,64$
Opory miejscowe dla 2 kolan segmentowych 30°	$\xi = 2 \cdot 0,17 = 0,34$
Opory miejscowe dla 6 kolan gładkich 90° R/d = 6	$\xi = 6 \cdot 0,09 = 0,54$
Opory miejscowe dla 4 zasuw bez przewężenia	$\xi = 4 \cdot 0,15 = 0,60$
Suma wszystkich oporów miejscowych	$\sum \xi = 2,12$
Opory miejscowe (długość równoważna)	$l_z = 60,50 \text{ m}$

przedstawione podstawowe dane projektowe w odniesieniu dla wody w temperaturze 25°C, które wykorzystano do weryfikacji obliczeń symulacyjnych.

W celu określenia charakteru przepływu oszacowano prędkość cieczy z zależności:

$$v = \frac{Q}{S} = 1,99 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (1)$$

gdzie: $S = \pi\left(\frac{d}{2}\right)^2$ pole powierzchni przekroju rury. Następnie

wyznaczono liczbę Reynoldsa Re z zależności [2]:

$$Re = \frac{4Q}{\pi d v} = 894582 \quad (2)$$

Ponieważ $Re \gg 2320$, zatem przepływ jest burzliwy. W dalszych rozważaniach, w celu wyznaczenia oporów przepływu ($\Delta p'$), odczytano z wykresu Moody'ego współczynnik oporów liniowych $\lambda = 0,014$ [2]. Podczas wyznaczania λ przyjęto, że przepływ odbywa się w rurach o chropowatości względnej 0,0001 [3].

W rozważaniach przyjęto, że opory miejscowe Δp instalacji transportującej można wyrazić jako długość równoważną rurociągu l_z , którą wyznaczono z zależności [2]:

$$l_z = \frac{\sum \xi}{\lambda} d = 60,50 \text{ m} \quad (3)$$

Opory miejscowe przepływu wyznaczono z zależności [2]:

$$\Delta p = \frac{\lambda}{d} \frac{8Q^2}{\pi^2 g d^4} (l + l_z) = 0,51 \text{ MPa} \quad (4)$$

Uwzględniając również stratę ciśnienia po całej długości rurociągu (opory liniowe), wyznaczono całościowe opory przepływu $\Delta p'$ z zależności [2]:

$$\Delta p' = \frac{(l + l_z) \cdot 1,04}{100} = 0,72 \text{ MPa} \quad (5)$$

3.2. Symulacja komputerowa

W kolejnym etapie przedmiotową instalację zamodelowano w środowisku programu Matlab & Simulink, posilując się danymi zawartymi w pozycjach literaturowych [4–7].

Na potrzeby symulacji (w oparciu o model fizyczny instalacji) opracowano model numeryczny w środowisku Matlab & Simulink, korzystając m.in. z biblioteki Simscape SimHydraulic (biblioteka zawierająca podstawowe bloki, jak: czujniki ciśnienia, czujniki przepływu, rury przepływowe, kolana, zbiorniki cieczy, pompy itp.), korzystając z technik symulacyjnych podanych w dokumentacjach [6, 7].

Model pompy został wykonany przy wykorzystaniu charakterystyk i danych właściwych dla pomp szlamowych serii AH

firmy Warman (materiały pozyskano od firmy Weir Minerals Poland Sp. z o.o.) [8].

Symulacja numeryczna została wykonana w celu wyznaczenia podstawowych parametrów technicznych podczas pracy modelu instalacji w warunkach ustalonych. W analizie rozważano wpływ rodzaju cieczy, jej lepkości i gęstości na wydajność pompy oraz całościowe opory przepływu w modelu instalacji transportującej. Na rys. 3 przedstawiono odwzorowanie modelu instalacji wykonane w środowisku programu Simulink.

W pierwszym podejściu przeprowadzono symulację komputerową instalacji dla parametrów podanych w tabeli 1 (odniesionych do wody) [3]. Wyniki wstępnych obliczeń parametrów roboczych instalacji, otrzymanych w sposób analityczny i z symulacji komputerowej, zestawiono w tabeli 2.

Można zauważyć, że różnica w wynikach dla obu szacowań nie przekracza 5%, co świadczy o poprawności założeń modelu symulacyjnego.

W kolejnym podejściu wykonano próbę wyznaczenia parametrów roboczych modelu instalacji wykonanej w skali laboratoryjnej (praca w stanie ustalonym dla teoretycznej cieczy zmieszanej z drobną frakcją stałą o ziarnie < 0,1 mm) wykorzystując do obliczeń opracowany model instalacji w środowisku Simulink.

W tabeli 3 zostały przedstawione dane wykorzystywane do symulacji instalacji transportującej mieszaninę wody z popiołem. W modelu założono, że ciecz jest jednofazowa i jednorodna (lepkość i gęstość przyjęto z pozycji [4]).

Jak wspomniano, dla uproszczenia modelu stworzonego w programie Matlab & Simulink oraz obliczeń, transportowane w analizowanej instalacji medium dwufazowe (woda zmieszana z popiołem) potraktowano jako ciecz jednofazową i jednorodną. Metodyka obliczeniowa została zaczerpnięta z literatury [2–7].

4. Analiza otrzymanych wyników

Wstępne wyniki numerycznie wyznaczonych parametrów roboczych analizowanej instalacji (dla skali laboratoryjnej) przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 2. Porównanie wyników obliczeń parametrów roboczych instalacji otrzymanych analitycznie i z symulacji

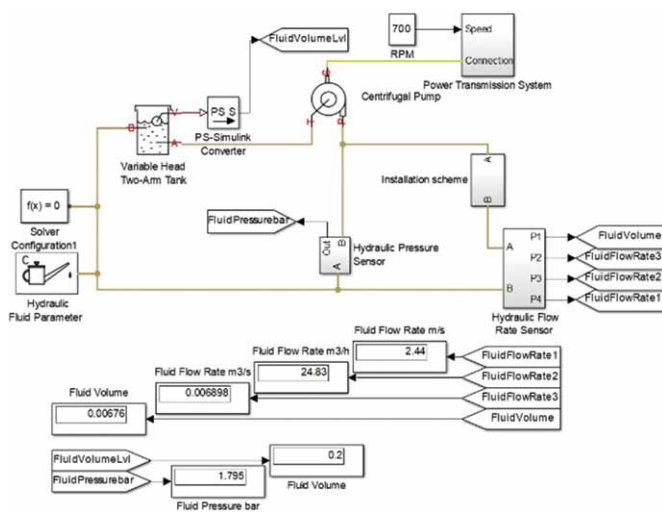
Model	Analityczny	Symulacyjny
Natężenie przepływu [m ³ /s]	0,250	0,243
Prędkość przepływu [m/s]	1,99	1,91
Opory przepływu [MPa]	0,72	0,75

Tabela 3. Dane projektowe dla instalacji laboratoryjnej wykorzystane do obliczeń symulacyjnych

Długość instalacji	$l = 8,50 \text{ m}$
Średnica umowna instalacji	$d = 0,06 \text{ m}$
Liczba kolan gładkich 90° R/d = 6	11 szt.
Liczba obrotów pompy	$n = 700 \text{ obr./min}$
Chropowatość	$2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

Tabela 4. Przykładowe wyniki obliczeń symulacyjnych dla modelu instalacji transportującej w zależności od różnych właściwości transportowanej cieczy

	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3
Właściwości transportowanej cieczy			
Gęstość mieszaniny δ [kg/m ³]	1400	1600	1800
Kinematyczny współczynnik lepkości ϑ [m ² /s]	0,105	0,398	0,690
Wyniki obliczeń z symulacji			
Natężenie przepływu Q [m ³ /s]	$10,04 \cdot 10^{-3}$	$6,89 \cdot 10^{-3}$	$4,80 \cdot 10^{-3}$
Opory przepływu (całkowite) $\Delta p'$ [MPa]	0,11	0,18	0,21



Rys. 3. Model instalacji opracowany w środowisku Simulink

Wszystkie symulacje (pomiar) dla modelu instalacji w skali laboratoryjnej zostały wykonane przy stałej prędkości obrotowej pompy (700 obr./min). Gęstości oraz współczynniki lepkości poszczególnych modelowych cieczy (pulp) zostały zaczerpnięte z literatury [4].

Wstępne porównanie wyników z obliczeń analitycznych i symulacyjnych odniesionych do wody wykazują dużą zbieżność wyników (tabela 2), zatem należy wnioskować o przydatności opracowanego modelu w dalszych pracach przy realizacji projektu.

Jak należało się spodziewać, wyniki symulacji wykazują silny wpływ współczynnika lepkości kinematycznej ϑ na całkowite opory przepływu $\Delta p'$, co wprost przekłada się na uzyskiwane natężenia przepływu Q .

W najbliższej perspektywie prowadzone będą dalsze prace nad udoskonaleniem modelu symulacyjnego opracowanego stanowiska badawczego (modelu instalacji do transportu materiałów erozyjnych i korozyjnych). Planuje się uwzględnić wpływ transportowanej cieczy dwufazowej na parametry robocze instalacji, przyjmując metodykę podaną w literaturze [9–11].

Na obecnym etapie prac należy przyjąć, że wyniki otrzymane z symulacji mają charakter szacunkowy i zostaną one zweryfikowane podczas przeprowadzania testów na rzeczywistym stanowisku badawczym.

Literatura

- [1] ZIENTEK P.: *Metody badań nieniszczących wybranych elementów konstrukcji turbozespołu małej mocy*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 3/2016.
- [2] GRABARCZYK Cz.: *Przepływ cieczy w przewodach – zadania obliczeniowe*. Envirotech, Poznań 1997.
- [3] Praca zbiorowa: *Poradnik termooenergetyka*. WNT, Warszawa 1965.
- [4] JANOSZEK T., LUBOSIK Z., ŁĄCZNY J., PRUSEK S.: *Modelowanie gęstych zawiesin popiołów lotnych w rurociągu podszkawkowym*. „Przegląd Górniczy” 2014.
- [5] PALARSKI J.: *Hydrauliczny transport materiałów podszkawkowych do wyrobisk górniczych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Gliwice 1987.
- [6] Dokumentacja techniczna Matlab, MathWorks 2018, <https://www.mathworks.com/help/matlab/index.html>, stan na sierpień 2018
- [7] Dokumentacja techniczna SIMULINK, MathWorks 2018, <https://www.mathworks.com/help/simulink/index.html>, stan na sierpień 2018
- [8] Materiały i katalogi od firmy Weir Minerals Poland Sp. z o.o., ul. Ignacego Domeyki 2, 30-066 Kraków.
- [9] LEVICH V. G.: *Physicochemical hydrodynamics*. Prentice Hall Inc., New Jersey 1962.
- [10] KAMIENSKI J.: *Mieszanie układów wielofazowych*. WNT, Warszawa 2004.
- [11] KOWALIŃSKI W., BAŁDYGA J.: *Przepływy i wymiana masy w układach dwufazowych ciecz – ciecz i ciecz – ciało stałe*. „Inżynieria i Aparatura Chemiczna” 4(49)/2010.

Pracę wykonano w ramach realizacji projektu nr POIR.04.01.04-00-0009/17-00 (Program Operacyjny Inteligentny Rozwój, Poddziałanie 4.1.4. Projekty Aplikacyjne) pt. „Kompleksowy, zautomatyzowany system NDT do diagnostyki stanu technicznego instalacji transportujących materiały erozyjne”. Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.



Tadeusz Mączka, Bartłomiej Borkowski

Instytut Automatyki Systemów Energetycznych Sp. z o.o.
Centrum Badawczo-Rozwojowe

artykuł recenzowany