

Modelowanie gęstych zawiesin popiołów lotnych w rurowości podszkawkowej

Modelling of dense slurry of fly ashes in a backfill pipeline



Dr inż. Tomasz Janoszek^{)}*



*Dr inż. Zbigniew Lubosik^{**)}*



Prof. dr hab. inż. Jacek Marian Łączny^{)}*



*Dr hab. inż. Stanisław Prusek,
prof. GIG^{**)}*

Treść: Przedmiotem opracowania jest zaprezentowanie możliwości zastosowania metod numerycznej mechaniki płynów do analizowania parametrów wydajnościowych związanych z procesem hydrotransportu w rurowości mieszaniny popiołowo-wodnej do podsadzania wyrobisk. Celem pracy jest zidentyfikowanie wartości ciśnień roboczych panujących w poszczególnych odcinkach analizowanej instalacji podsadzkowej w warunkach hydrotransportu gęstej zawiesiny popiołów lotnych. Analizą objęto rzeczywiste parametry geometryczne rurowości podsadzkowej w jednej z polskich kopalń węgla kamiennego.

Abstract: The purpose of this study is to demonstrate the applicability of the Computational Fluid Dynamics methods to analyze the performance parameters of the hydraulic transportation of ash-water mixture in the gravity transportation pipeline. The aim of the test is to identify the values of working pressures in the given sections of the pipeline under the conditions of hydraulic transportation of fly ash slurry. The analysis included the actual geometric parameters of the pipeline in one of the Polish coal mines.

Słowa kluczowe:

numeryczna mechanika płynów, hydrotransport, mieszaniny wodno-popiołowe, podsadzka

Key words:

Computational Fluid Dynamics, hydraulic transport, ash-water mixtures, backfill

1. Wprowadzenie

W eksploatacji górniczej od lat znajdują zastosowanie gęste zawiesiny popiołów lotnych, które, za pomocą instalacji

grawitacyjnej, transportuje się z poziomu szybu kopalnianego do wyrobisk górniczych lub zrobów w celu ich wypełnienia [1, 4]. Zawiesiny te stosowane mogą być do: doszczelniania zrobów zawałowych, likwidacji wyrobisk korytarzowych, wy-

^{*)} Główny Instytut Górnictwa, Zakład Terenów Przemysłowych i Gospodarki Odpadami, ^{**)} Główny Instytut Górnictwa, Zakład Technologii Eksploatacji i Obudów Górniczych

pełnienia starych pustek w górotworze, wykonywania pasów i korków podsadzkowych, likwidacji szybów i szybków oraz jako składnik podsadzki samozestalającej i w technologiach związanych z profilaktyką przeciwpożarową. Podstawowymi zaletami stosowania mieszanin wodno-popiołowych w górnictwie są [1, 10]:

- dobre właściwości penetracyjne,
- dobre właściwości izolacyjne w obszarach zagrożonych rozwojem pożaru (zroby, zbędne wyrobiska), poprzez ograniczenie dostępu utleniacza ze strumienia powietrza niezależnego,
- niska przepuszczalność,
- bardzo niska wymywalność metali ciężkich,
- właściwości samozestalające, co umożliwia otrzymanie monolitycznej struktury w krótkim czasie, a tym samym ograniczenia deformacji powierzchni terenu.

Instalacja do transportu materiału podsadzkowego (w tym zawieszin popiołów lotnych) składa się z odcinków rur o zadanej średnicy, połączonych ze sobą za pomocą znormalizowanych kolan, dyfuzorów oraz kształtek rurowych. Całość stanowi skomplikowany układ przestrzenny, w którym, ze względu na jego złożoność, mogą wystąpić stany awaryjne w grawitacyjnym przepływie transportowanej mieszaniny. Przez stany awaryjne należy rozumieć możliwość wystąpienia lokalnych niedrożności instalacji, tworzenie się korków powietrznych (które w rezultacie mogą prowadzić do powstawania erozji rur lub przepływu mieszaniny niepełnym przekrojem rury), czy też uszkodzeń mechanicznych rurociągu [11]. Metodą prewencyjną eliminującą występowanie stanów awaryjnych jest analiza parametrów wydajnościowych instalacji podsadzkowej, w szczególności wyznaczenie wartości ciśnień roboczych panujących na poszczególnych odcinkach rurociągu [1, 7, 11].

W literaturze [4, 11] mamy kilka metod obliczania parametrów wydajnościowych instalacji grawitacyjnej do transportowania hydromieszanin, a mianowicie:

- R. Adamka,
- analityczno-empiryczna,
- W. Budryka,
- Korzajewa-Dobrowolskiego,
- statystyczna.

Metoda Adamka pozwala na analizowanie parametrów wydajnościowych instalacji grawitacyjnej dla dwóch rodzajów materiałów: piasku, piasku i skał płonnych o uziarnieniu w przedziale 14÷50 mm.

Metoda analityczno-empiryczna stanowi interpretację wyników prowadzonych badań laboratoryjnych, które doprowadziły do opracowania zależności empirycznych umożliwiających analizowanie wpływu ruchu hydromieszaniny (woda-piasek) na wartość zmian parametru ciśnienia w rurociągu w zakresie zmian średnicy 0.125÷0.150 m.

Metoda W. Budryka pozwala na analizowanie parametrów wydajnościowych instalacji podsadzkowej w warunkach transportowania mieszaniny podsadzkowej składającej się z piasku i wody. W oparciu o nomogramy istnieje możliwość prognozowania maksymalnej wydajności rurociągu podsadzkowego w zależności od jego podstawowych parametrów geometrycznych, takich jak długość rurociągu czy różnica wysokości pomiędzy wlotem a wylotem.

Metoda Korzajewa-Dobrowolskiego opracowana została z zamiarem doboru optymalnych parametrów wydajności projektowanej instalacji podsadzkowej w warunkach hydrotransportu rurociągiem o średnicy 150 mm materiału piasku z udziałem rozdrobnionych skał płonnych o wielkości ziaren do 50 mm.

Metoda statystyczna pozwala natomiast analizować proces przenoszenia mieszaniny wody z piaskiem w rurociągu

o średnicy 185 mm. Operując odpowiednimi zależnościami, istnieje możliwość oszacowania natężenia przepływu zaczynu w instalacji podsadzkowej przy jednoczesnym wyznaczeniu wartości prędkości krytycznej, dla której ruch hydromieszaniny jest utrudniony.

Wszystkie omawiane metody pozwalają wprawdzie na analizowanie parametrów wydajnościowych instalacji grawitacyjnej, jednak tylko dla mieszanin, które w swoim składzie zawierają piasek lub piasek z udziałem rozdrobnionych frakcji skał płonnych. Stosowanie ich do analizowania ruchu gęstych zawieszin popiołów lotnych nie znajduje jednak zastosowania. Wynika to bezpośrednio z odmiennego zachowania się mieszanin wytwarzanych z udziałem odpadów energetycznych. Różnice te wynikają przede wszystkim z faktu, że mamy do czynienia z mieszaniną, która w warunkach transportu rurociągiem zmienia swoje właściwościami reologiczne (lepkość, rozlewność, granica płynięcia), fizyczne (gęstość) i chemiczne. Przykładowo, dynamiczny współczynnik lepkości dla mieszaniny wody i popiołu pochodzącego z kotła fluidalnego, w zależności od masowego udziału części stałych do wody, zmienia się w granicach od 0.1107, Pa·s do 0.6519, Pa·s, dla popiołu bez odsiarczania zmienność ta wynosi od 0.1050, Pa·s do 0.6903, Pa·s, natomiast dla popiołu z półsuchej metody odsiarczania przedział ten zawiera się od 0.0267, Pa·s do 0.2430, Pa·s. Z punktu widzenia hydrotransportu tego typu zaczynów do wyrobisk, istotnym parametrem okazuje się być granica płynięcia oraz współczynnik lepkości, które to bezpośrednio determinują parametr rozlewności, a tym samym wydajność procesu przetłaczania [14].

Ze względu na znaczne koszty prowadzenia badań związanych z opracowaniem nowych zależności oraz nomogramów opisujących zmienność parametrów wydajnościowych instalacji podsadzkowej, przeznaczonej do transportu gęstych zawieszin popiołów lotnych, innowacyjną metodą okazuje się być modelowanie numeryczne tego typu procesów z zastosowaniem numerycznej mechaniki płynów CFD (z ang. *Computational Fluid Dynamics*). Numeryczna mechanika płynów stanowi obecnie szybko rozwijającą się dziedzinę nauki, która podejmuje się rozwiązywania zagadnień związanych z analizowaniem wpływu ruchu płynu (cieczy i gazów) na procesy wymiany ciepła i masy w skończonej objętości stanowiącej obraz geometryczny analizowanego układu [5].

W związku z powyższym w pracy zaprezentowano wyniki symulacji warunków zmienności parametrów wydajnościowych procesu hydrotransportu mieszaniny popiołów lotnych i wody, jako wynik przyjętej geometrii instalacji podsadzkowej, z zastosowaniem formalizmu numerycznej mechaniki płynów.

2. Analiza rozkładu zmian ciśnienia w rurociągu metodą CFD

2.1. Geometria rurociągu

Geometria układu przestrzennego instalacji podsadzkowej została oparta o dane odnośnie:

- współrzędnych położenia trasy rurociągu,
- średnic rurociągu na jego poszczególnych odcinkach,
- rzędne wysokości odcinka rurociągu.

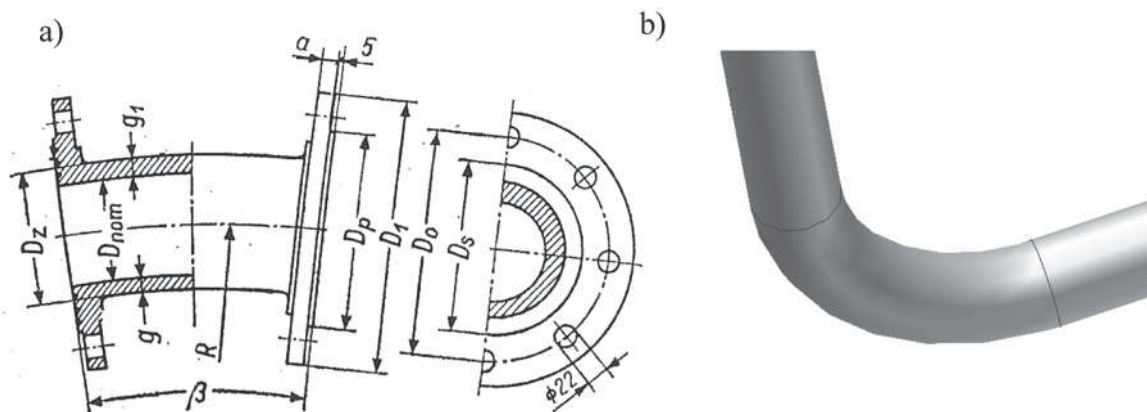
W tabeli 1 zestawiono parametry geometryczne analizowanej instalacji podsadzkowej przeznaczonej do zatłaczania zawiesziny wodno-popiołowej z szybu A do ściany 1.

Przyjęta do obliczeń geometria ustalona została w oparciu o następujące elementy rurociągu podsadzkowych: rury podsadzkowe wg normy [12] (rys.1) oraz kształtki rurowe wg normy [13] (rys.2).

Tabela 1. Parametry geometryczne instalacji podszkawkowej z szybu do ściany 1
 Table 1. Geometric parameters of gravity transportation pipeline from the shaft to longwall 1

L.p.	Nazwa wyrobiska	SYMBOL ODCINKA	DŁUGOŚĆ ODCINKA		RZĘDNE WYSOKOŚCI ODCINKA		RÓŻNICA WYSOKOŚCI	ŚREDNICA RURUCIĄGU	KĄT NACHYLENIA	ILOŚĆ KOLAN	WSPÓŁRZĘDNE		
			L_p , m	h_{kn-1} , m	h_{kn} , m	h_{1p} , m					nr	X	Y
1	szyb	0-1	615.1	276.0	-339.1	-339.1	615.1	0.185	90.0	2	0	-13490,62	20340,79
2	podszybie	1-2	40.0	-339.1	-339.1	-339.1	0.0	0.185	0.9	2	1	-13508,60	20370,02
3	pochylnia 1	2-3	64.0	-339.1	-348.1	-348.1	9.0	0.185	2.1	2	2	-13455,08	20399,54
4	pochylnia 1	3-4	90.0	-348.1	-343.2	-343.2	-4.9	0.185	-1.2	2	3	-13382,02	20348,49
5	chodnik wentylacyjny 1	4-5	264.0	-343.2	-335.4	-335.4	-7.8	0.185	-2.0	1	4	-13378,54	20089,50
6	chodnik łączący	5-6	226.0	-335.4	-345.7	-345.7	10.3	0.185	3.7	1	5	-13251,12	19918,63
7	pochylnia 2	6-7	160.0	-345.7	-334.0	-334.0	-11.7	0.185	-3.3	1	6	-13070,00	19992,53
8	chodnik wentylacyjny 2	7-8	600.0	-334.0	-346.8	-346.8	12.8	0.185	1.5	1	7	-13063,92	19702,55
9	pochylnia wentylacyjna 1	8-9	24.0	-346.8	-345.2	-345.2	-1.6	0.185	-3.8	1	8	-12499,66	19522,01
10	chodnik wentylacyjny 3	9-10	72.0	-345.2	-333.2	-333.2	-12.0	0.185	-9.5	1	9	-12508,68	19497,71
11	pochylnia 3	10-11	358.0	-333.2	-422.9	-422.9	89.7	0.185	14.1	1	10	-12441,54	19476,12
12	upadowa	11-12	256.0	-422.9	-449.0	-449.0	26.1	0.185	5.8	2	11	-12274,52	19799,43
13	chodnik 1	12-13	130.0	-449.0	-503.2	-503.2	54.2	0.185	10.3	1	12	-12163,23	19560,51
14	przecinka 1	13-14	70.0	-503.2	-514.1	-514.1	10.9	0.150	12.0	1	13	-11752,24	19472,39
15	chodnik odstawczy	14-15	260.0	-514.1	-510.6	-510.6	-3.5	0.150	-2.0	1	14	-11729,71	19534,17
16	dowierzchnia 1	15-16	860.0	-510.6	-576.3	-576.3	65.7	0.150	12.0	1	15	-11452,47	19474,84

Źródło: opracowanie własne

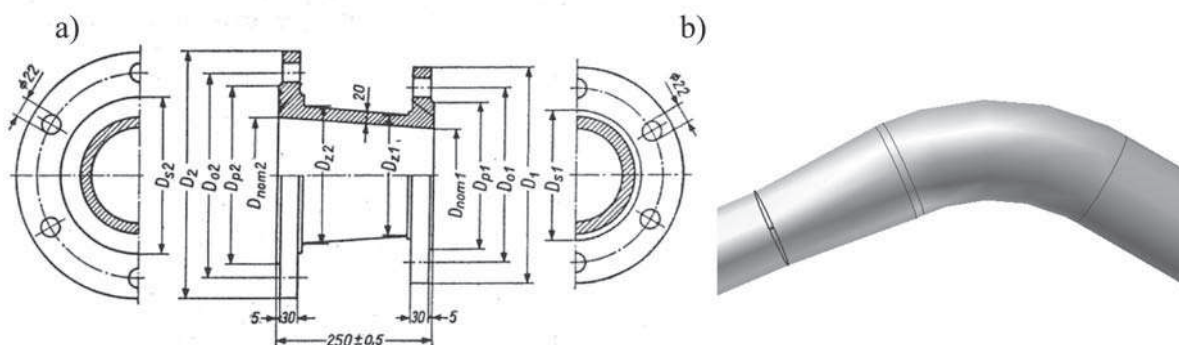


Rys. 1. Podszkawkowe kolano do rurociągów stalowych: a) rysunek techniczny, b) model geometryczny

Źródło: a) [3], b) opracowanie własne

Fig. 1. Backfilling mitre turn: a) technical drawing, b) geometric model.

Source: a) [3], b) own elaboration



Rys. 2. Zwężki do rurociągów podszkawkowych: a) rysunek techniczny, b) model geometryczny

Źródło: a) [3], b) opracowanie własne

Fig. 2. Convergent pipe: a) technical drawing, b) geometric model,

Source: a) [3], b) own elaboration

Rysunek 3 przedstawia model przestrzenny trasy rurociągu podszkawkowego z szybu A do ściany 1, który został opracowany do celów symulowania transportu mieszaniny popiołowo-wodnej. Poszczególne długości odcinków rurociągu, położenie oraz ich średnice ustalono na podstawie danych zawartych w tabeli 1.

2.2. Obszar dyskretyzacji rozwiązania numerycznego

Na rysunku 4 przedstawiono wyniki opracowanej siatki numerycznej obszaru przepływu mieszaniny w analizowanej geometrii instalacji podszkawkowej do ściany 1.

Dla obszaru dyskretyzacji modelu geometrycznego rurociągu prowadzonego do ściany 1 (rys. 4) wygenerowano następujące rodzaje siatek numerycznych:

- siatkę numeryczną modelu bryłowego odcinka rurociągu 0-9 utworzonego z 383 477 punktów węzłowych połączonych 1 217 390 elementami prostymi, które stanowią obraz geometryczny obszaru zajmowany przez płyn,
- siatkę numeryczną modelu bryłowego odcinka rurociągu 9-15 utworzonego z 350 608 punktów węzłowych połączonych 1 032 179 elementami prostymi, które stanowią obraz geometryczny obszaru zajmowany przez płyn.

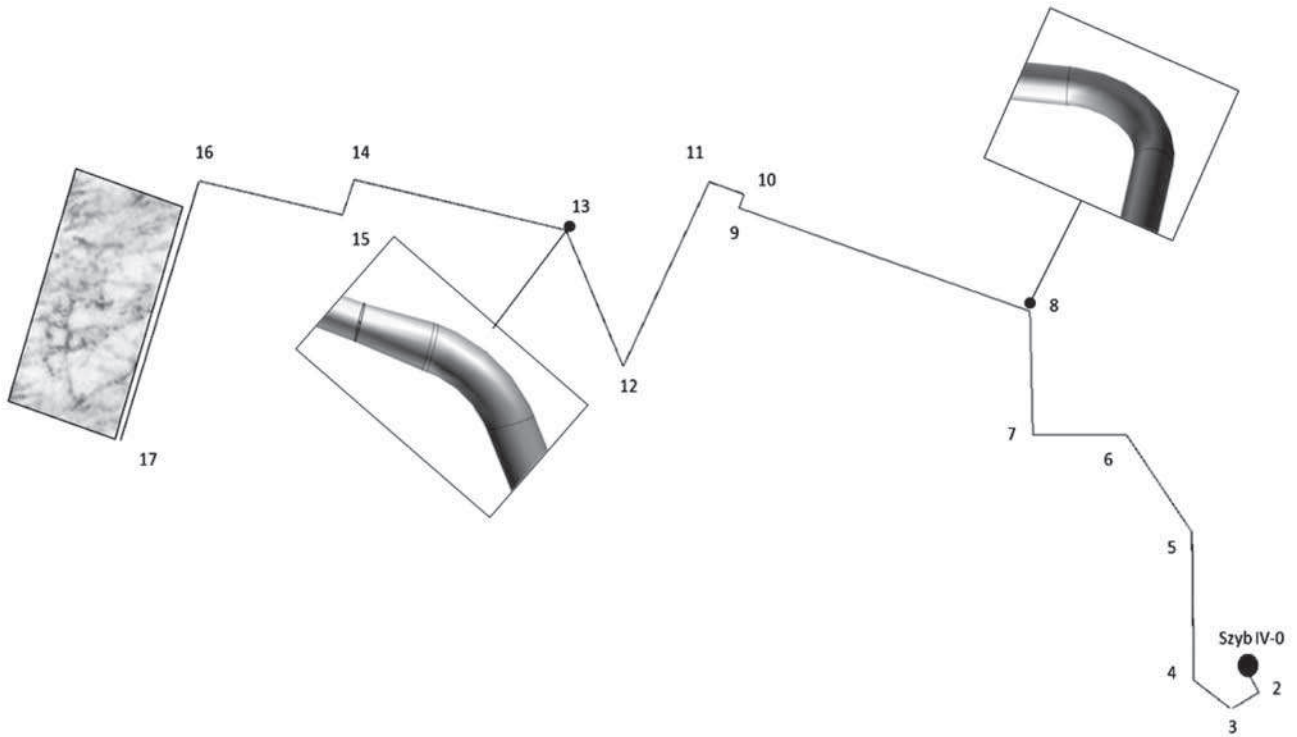
Przedstawiony na rysunku 4 model przestrzenny, umożliwił wykonanie obliczeń numerycznych, zmierzających do

określenia średnich wartości zmian ciśnienia roboczego w poszczególnych odcinkach analizowanej geometrii rurociągu.

2.3. Analiza reologiczna gęstych zawiesin popiołów lotnych

Doświadczalnie wyznaczono krzywe płynięcia, z zastosowaniem wiskozymetru rotacyjnego Rheotest-2, dla mieszaniny popiół-woda o udziale objętościowym poszczególnych składników 1:1, uzyskując zawartość części stałych w zawieszynie w przedziale 490÷500 g/dm³. Rezultaty prowadzonych badań reologicznych zaprezentowano na rysunkach 5 i 7 w postaci krzywych płynięcia w układzie współrzędnych τ (naprężenie ścinające) oraz γ (prędkość ścinania). Na rysunkach tych zamieszczono empiryczne równania potęgowe, otrzymane metodą regresji, opisujące empiryczne krzywe płynięcia. Otrzymane wartości parametrów R² (równe lub większe od 0,9) pozwalają stwierdzić, że własności reologiczne badanych mieszanin popiołu i wody z zadawalającą dokładnością odwzorowuje równanie potęgowe Ostwalda de Waele.

Na rysunkach 6 i 8 przedstawiono krzywe lepkości pozornej w funkcji szybkości ścinania. We wszystkich przypadkach obserwuje się zmniejszenie lepkości pozornej w miarę wzrostu szybkości poruszania się zawiesziny w rurociągu.

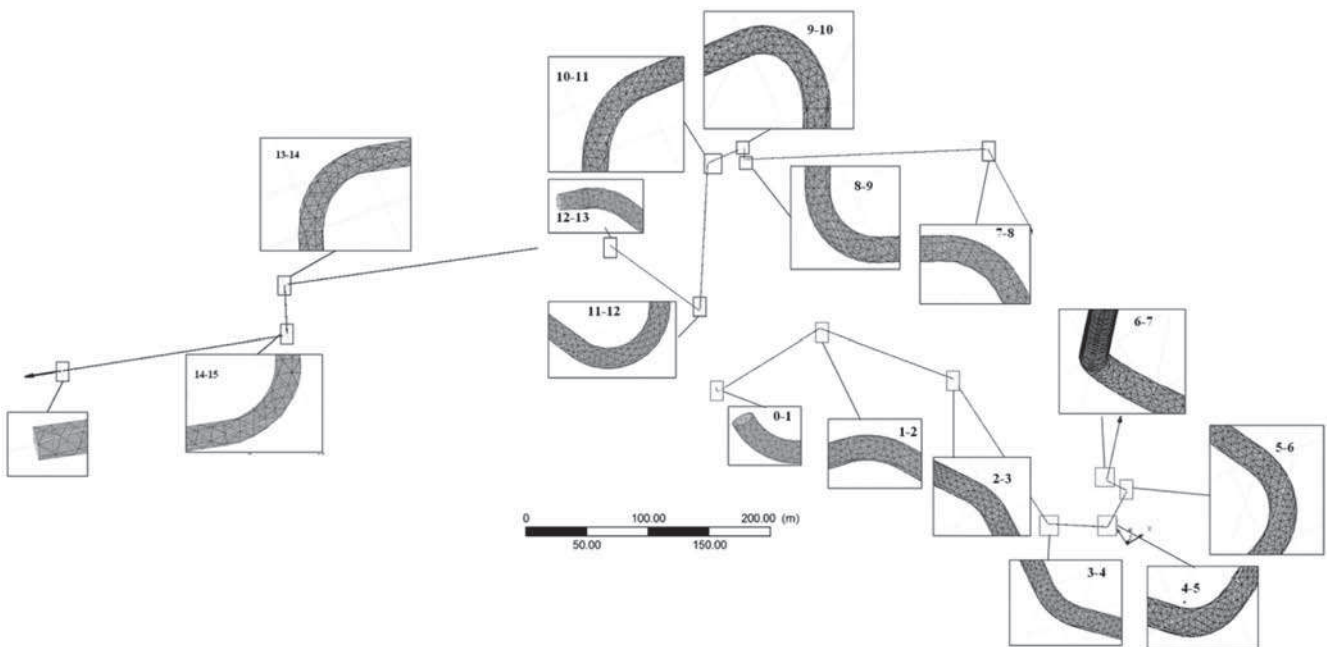


Rys. 3. Model geometryczny instalacji podsadzkowej z szybu A do ściany 1

Źródło: opracowanie własne

Fig. 3. Geometric model of the gravity transportation pipeline from shaft A to longwall 1

Source: own elaboration

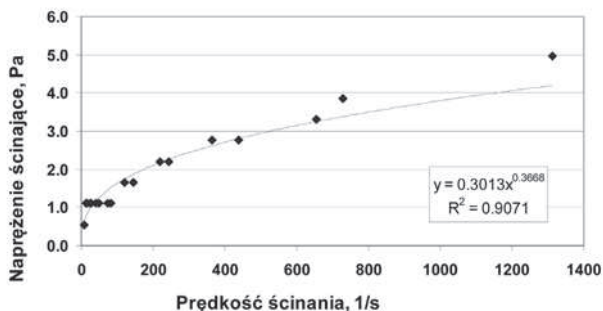


Rys. 4. Obszar dyskretyzacji modelu geometrycznego rurociągu do ściany 1

Źródło: opracowanie własne

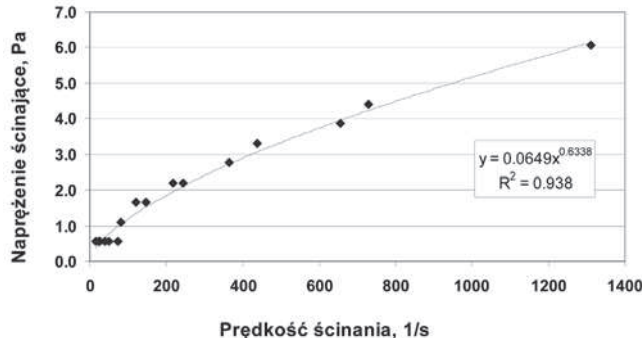
Fig. 4. Simulation grid of the gravity transportation pipeline to longwall 1

Source: own elaboration



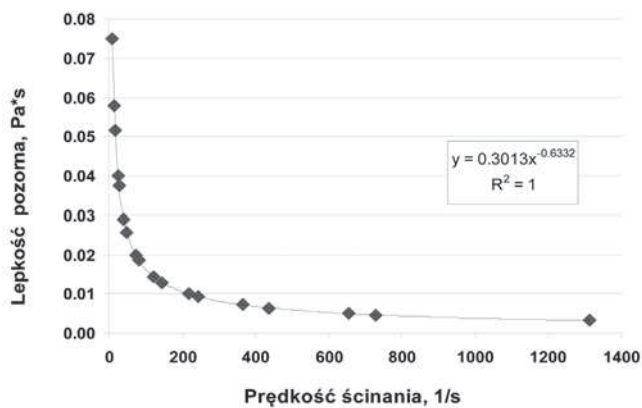
Rys. 5. Krzywa płynięcia zawiesiny popiołu z elektrowni Siersza
Źródło: opracowanie własne

Fig. 5. Curve of the ash slurry flow from Siersza power plant
Source: own elaboration



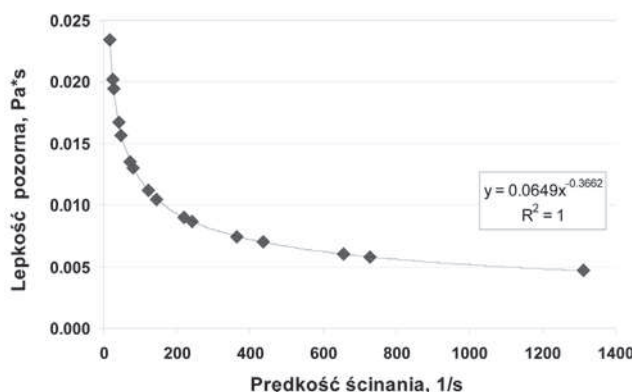
Rys. 7. Krzywa płynięcia zawiesiny popiołu z elektrowni Lagisza
Źródło: opracowanie własne

Fig. 7. Curve of the ash slurry flow from Lagisza power plant
Source: own elaboration



Rys. 6. Zależność lepkości pozornej od prędkości ścinania zawiesiny popiołu z elektrowni Siersza
Źródło: opracowanie własne

Fig. 6. Apparent viscosity in relation to the shear rate of the fly ash slurry from Siersza power plant
Source: own elaboration



Rys. 8. Zależność lepkości pozornej od prędkości ścinania zawiesiny popiołu z elektrowni Lagisza
Źródło: opracowanie własne

Fig. 8. Apparent viscosity in relation to the shear rate of the fly ash slurry from Lagisza power plant
Source: own elaboration

2.4. Założenia metody numerycznej CFD

Modelowanie przepływu badanej mieszaniny w ujęciu numerycznej mechaniki płynów wymaga przedstawienia przepływającego płynu, jako rozkładu zmian parametrów ciśnienia i prędkości. Parametry te określane są w przestrzeni o zdefiniowanej geometrii i wyznaczone w określonym przedziale czasu. Modelowanie hydrotransportu gęstych zawiesin popiołów lotnych z wykorzystaniem metod CFD polega na uzyskaniu rozwiązania układu równań różniczkowych opisujących zasadę zachowania masy, pędu i energii płynu w przestrzeni stanowiącej model geometryczny rurociągu o zadanej geometrii. Podstawowe równania determinujące zachowanie się przepływającego płynu w rurociągu wyrażono następującymi zależnościami [2]

– równanie zachowania masy [2]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

gdzie:

- ρ – gęstość płynu, kg m⁻³
- t – czas, s
- \vec{v} – wektor prędkości, m s⁻¹

– równanie zachowania pędu [2]

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

gdzie:

- p – ciśnienie, N m⁻²
- \vec{F} – wektor siły, N
- \vec{v} – wektor prędkości, m s⁻¹
- \vec{g} – wektor przyspieszenia ziemskiego, m s⁻²
- $\vec{\tau}$ – tensor naprężeń, N m⁻²

– równanie zachowania energii [2]

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} h) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_h \quad (3)$$

gdzie:

- T – temperatura, K
- k – współczynnik przewodzenia ciepła, W m⁻¹ K⁻¹
- S_h – człon źródłowy, kg m⁻³ s⁻¹
- \vec{v} – wektor prędkości, m s⁻¹
- h – entalpia, J kg⁻¹

Zawiesiny popiołów lotnych należą do grupy płynów niutonowskich, spełniających równanie potęgowe Ostwalda de Waele. Transport modelowej hydromieszaniny wzduż modelowego układu przestrzennego rurociągu potraktowano jako

izotermiczny przepływ płynu, dla którego wartość parametru lepkości stanowi minimum funkcji modelu reologicznego Ostwalda de Waele w postaci [2]

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \Rightarrow \mu = K \left\{ \min[\dot{\gamma}_{\max}, \max(\dot{\gamma}_{\min})] \right\}^{n-1} \quad (4)$$

gdzie:

- $\dot{\gamma}_{\max}$ – prędkość ścinania na ścianie rurociągu, s^{-1}
- $\dot{\gamma}_{\min}$ – prędkość ścinania w osi rurociągu, s^{-1}
- n – wskaźnik płynięcia,
- K – współczynnik konsystencji, $Pa \cdot s^n$

Model potęgowy Ostwalda de Waele stanowi matematyczną interpretację krzywej płynięcia modelowanej zawiesiny popiołów lotnych. Powyższe wyrażenie (4) zostało zaimplementowano do programu Ansys-CFX. Wartość prędkości ścinania mieszanki w osi kanału przyjęto na poziomie 2, s^{-1} . Przyjęte założenie ($\dot{\gamma}_{\min}$) do modelu (5) odpowiada mieszaninie o stężeniu części stałych (popiołów lotnych) względem wody na poziomie 68% [9]. Natomiast wartość prędkości ścinania modelowanej zawiesiny popiołów lotnych poszukiwano rozwiązując wyrażenie (5) [15]

$$\dot{\gamma}_{\max} = \left[3 + \left(\frac{1}{n} \right) \right] \cdot \frac{\dot{Q}_{\max}}{\pi \cdot R_{\max}^3} \quad (5)$$

gdzie:

- \dot{Q}_{\max} – natężenie przepływu transportowanej mieszanki w rurociągu, $m^3 \cdot s^{-1}$
- R_{\max} – promień rurociągu 0.0925, m,
- n – wskaźnik płynięcia

Wartość strumienia objętości przepływającej mieszanki wodno-popiołowej poszukiwano rozwiązując zależność (6)

$$\dot{Q}_{\max} = v \cdot \pi \cdot R_{\max}^2 \quad (6)$$

gdzie:

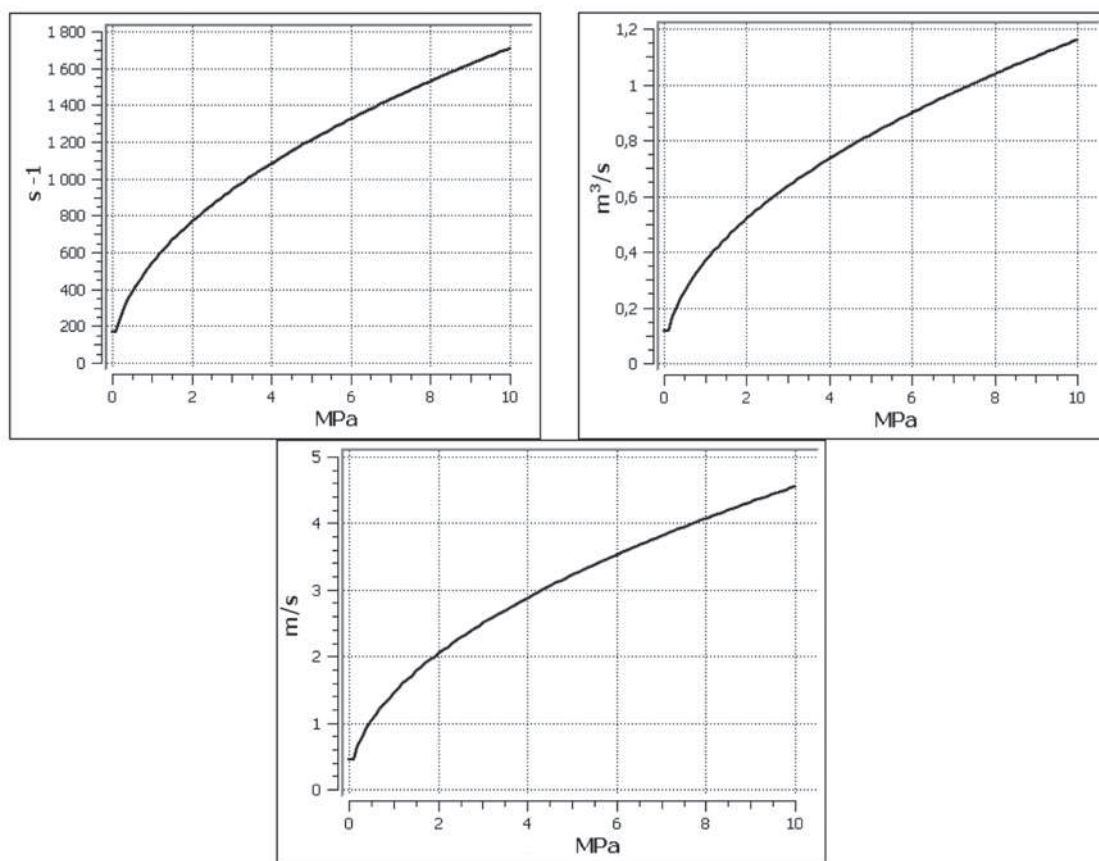
- \dot{Q}_{\max} – natężenie przepływu transportowanej mieszanki w rurociągu, $m^3 \cdot s^{-1}$
- v – prędkość mieszanki, $m \cdot s^{-1}$

Ostatnim etapem poszukiwania rozwiązania zależności (4) jest określenie wartości prędkości przepływu mieszanki, którą zdecydowano się zaimplementować w programie Ansys-CFX w następującej postaci [6]

$$v = \sqrt{\frac{a \cdot p \cdot D}{\lambda \cdot \rho}} \quad (7)$$

gdzie:

- D – średnica rurociągu 0.185 m,
- p – wartość ciśnienia roboczego w rurociągu, Pa



Rys. 9. Krzywa zmian poszczególnych parametrów charakteryzujących hydrotransport modelowej zawiesiny popiołu w analizowanej geometrii rurociągu w funkcji zmian ciśnienia roboczego: a) wartość zmian prędkości ścinania, b) wartość zmian strumienia objętości, c) wartość zmian prędkości mieszanki w rurociągu

Źródło: opracowanie własne

Fig. 9. Curve of the change of parameters characterizing the flow of the fly ash slurry along the gravity transportation pipeline in relation to the changes in working pressure: a) shear rate, b) volume flow, c) velocity

Source: own elaboration

- a – współczynnik uwzględniający wpływ geometrii rurociągu na ruch badanej mieszaniny $0.0003123, \text{m}^{-1}$
 ρ – gęstość mieszaniny, kg m^{-3}
 λ – współczynnik oporów przepływu w rurociągu $\lambda=0.015$ [6]

Implementacja wyrażenia (4), w środowisku systemowym Ansys-CFX, prowadzi do poszukiwania optymalnej wartości parametru prędkości przepływu mieszaniny w modelowej geometrii rurociągu, poszukując minimum funkcji zmian wartości ciśnienia roboczego. Ponadto zależność (7) stanowi warunek brzegowy rozwiązania numerycznego hydrotransportu analizowanej mieszaniny określany na wlocie rurociągu. Na rysunku 9 zaprezentowano rezultaty opracowanych modeli matematycznych w postaci krzywych obrazujących zakres zmian wartości parametru prędkości ścinania na ścianie rurociągu, natężenia przepływu mieszaniny oraz wartości prędkości przepływającej mieszaniny w zależności od zmian ciśnienia roboczego. Na uwagę zasługuje krzywa odwzorowująca zakres zmian wartości parametru prędkości ścinania (rys. 9a), która jest tożsama z charakterystykami mieszanin wodno-popiołowych, jakie uzyskano w badaniach na viskozymetrze (rys. 5-8).

Uwzględniono następujące warunki rozwiązania dla opracowanego obszaru dyskretyzacji:

- temperatura mieszaniny – 25°C (przepływ izotermiczny),
- rozpatrywano stan nieustalony,
- średnica rurociągu – $0.18, \text{m}$,
- model turbulencji – $k-\varepsilon$,
- gęstość mieszaniny $1862, \text{kg m}^{-3}$,
- wskaźnik płynięcia $n=1.5, 2$,
- zbieżność obliczeń – $1 \cdot 10^{-4}$.

2.5. Opracowanie wyników badań modelowych

W formie wykresu ujęto wartości zmian szukanych parametrów roboczych instalacji otrzymane z modelu numerycznego CFD. Rysunek 10 opisuje zmienność wartości ciśnień roboczych instalacji podsadzkowej transportującej mieszaninę wodno-popiołową z szybu A do ściany 1. Uzyskane wyniki

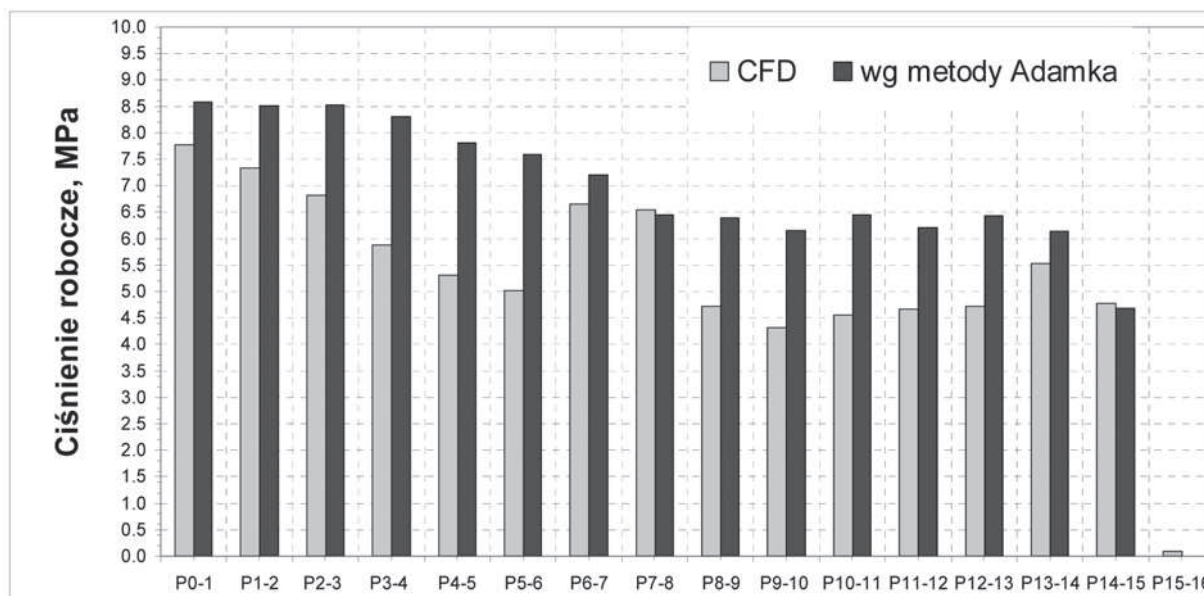
rozwiązania numerycznego zestawiono z wynikami otrzymanymi drogą obliczeniową wg metody Adamka [1].

Analizując wyniki przeprowadzonych obliczeń, zauważyć można, że na poszczególnych odcinkach rurociągu podsadzkowego występują różnice w wyznaczonych wartościach ciśnienia roboczego z wykorzystaniem modelowania numerycznego oraz metody empirycznej wg Adamka. Wartości ciśnień wyznaczone według metody Adamka wyższe w stosunku do ciśnień wyznaczonych metodą modelowania numerycznego od ok. 10 do nawet o 50% (za wyjątkiem dwóch odcinków gdzie są nieznacznie mniejsze). Prawdopodobnie wynika to z faktu, iż metoda empiryczna Adamka opracowana została na potrzeby wyznaczania parametrów przepływu mieszanin piasku lub skał z wodą, a nie dla analizowanej w niniejszym artykule mieszaniny pyłów lotnych z wodą.

3. Podsumowanie i wnioski

W ramach pracy skorzystano z modułu Ansys Design-Modeler, w którym wykonano model przestrzenny instalacji podsadzkowej, bazując na danych zamieszczonych w tabeli 1. Opracowana geometria układu przestrzennego instalacji posłużyła następnie jako model bazowy przy opracowywaniu obszaru dyskretyzacji rozwiązania numerycznego. Wygenerowaną siatkę numeryczną zaimplementowano do programu Ansys-Fluent, w którym przeprowadzono obliczenia numeryczne symulujące transport hydromieszaniny wodno-popiołowej. Na podstawie wyników prowadzonych badań modelowych sformułowano następujące wnioski:

1. W oparciu o parametry opisujące położenie instalacji podsadzkowej w przestrzeni oraz parametry fizykochemiczne hydromieszaniny istnieje możliwość prognozowania podstawowych parametrów wydajnościowych instalacji grawitacyjnej, wykorzystując do tego celu komputerowe metody mechaniki płynów.
2. Zastosowanie formalizmu numerycznej mechaniki płynów do zagadnień związanych z hydrotransportem mieszanin na bazie popiołów lotnych okazuje się pomocne już na



Rys. 10. Rozkład zmian ciśnienia roboczego w instalacji podsadzkowej transportującej zaczyn wodno-popiołowy do ściany 1

Źródło: opracowanie własne

Fig. 10. Distribution of working pressure changes along the gravity transportation pipeline with ash-water slurry to longwall 1

Source: own elaboration

- etapie projektowania instalacji do podsadzania wyrobisk.
- Prace modelowe w programie Ansys wymagałyby weryfikacji w warunkach rzeczywistych w celu kalibracji modelu.

Niniejszy artykuł powstał jako efekt prowadzonych prac w Głównym Instytucie Górnictwa w ramach projektu IMPREX – Improved extraction ratios for deep coal mines (Poprawa współczynnika wykorzystania złoża w kopalniach głębinowych). Projekt finansowany był przez Fundusz Badawczy dla Węgla i Stali (Research Fund for Coal and Steel) – kontrakt nr RFCR-CT-2008-0001 oraz Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (decyzja nr 968/FBWS/2009/7 z dnia 7.04.2009 r.)

Literatura

- Adamek A.: Podsadzanie wyrobisk górniczych. Wydawnictwo Śląsk. Katowice 1980.
- ANSYS FLUENT 12.0 Documentation. Ansys Inc, luty 2009.
- Bielewicz T., Prus B., Honysz J.: Górnictwo - cz. 2. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1993.
- Fraczek R.: Zasady stosowania mieszanin wodno-popiołowych transportowanych rurociągiem. „Ratownictwo Górnicze” 2002, nr 3.
- Jaworski Z.: Numeryczna mechanika płynów w inżynierii procesowej i chemicznej. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2005.
- Kamiński J.: Zależność strat ciśnienia od prędkości przepływu i gęstości hydromieszanki, zawierającej piasek i gruboziarniste odpady górnicze, w łukach rurociągu podsadzkowego poziomego. Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa, nr 808, Katowice 1995.
- Lisowski A.: Podsadzka hydrauliczna w polskim górnictwie. Katowice 1997.
- Mazurkiewicz M.: Technologiczne i środowiskowe aspekty stosowania stałych odpadów przemysłowych do wypełniania pustek w kopalniach podziemnych. „Zeszyty Naukowe AGH. S. Górnictwo” 1995, nr 152.
- Naika H.K., Mishra M.K., Rao Karanamb U.M., Debb D.: Evaluation of the role of a cationic surfactant on the flow characteristics of fly ash slurry. Journal of Hazardous Materials 2009, nr 169.
- Nowak A.K.: Ekologiczne-techniczne aspekty procesów pozyskiwania koncentratów cynku i ołowiu. Praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 2008.
- Parski J.: Hydrotransport. WNT, Warszawa 1982.
- PN-G-44001: 1998 – „Rury stalowe do podsadzki hydraulicznej. Rury kołnierzowe”
- PN-EN 1092-1: 2006 – „Kołnierze i ich połączenia. Kołnierze okrągłe do rur, armatury, kształtek, łączników i osprzętu z oznaczeniem PN”
- Plewa F., Popczyk M.: Badanie parametrów reologicznych hydromieszanki wytwarzanych na bazie odpadów energetycznych. „Polityka Energetyczna” 2008, t. 1, z. 1.
- Wilczyński K.: Reologia w przetwórstwie tworzyw sztucznych. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2001.