

Dobór średnicy kolektora metanowego na podstawie symulacji komputerowej mechaniki płynów w warunkach górniczo-geologicznych JSW S.A.

Selection of methane collector diameter based on computer simulation of fluid mechanics in mining and geological conditions JSW S.A.



Doc. Ing. Pavel Zapletal, Ph.D. *)



Mgr inż. Maciej Kosowski *)

Treść: Celem artykułu jest porównywanie zależności ciśnienia panującego w rurociągu odmetanowania do objętości mieszaniny gazu kopalnianego odprowadzanego do tegoż rurociągu pojedynczym kolektorem metanowym. Badanie przeprowadzono na podstawie symulacji komputerowej mechaniki płynów w programie Ansys Fluent poprzez utworzenie sieci pomiarowej oraz nadanie odpowiednich warunków brzegowych. W rezultacie otrzymano wyniki potwierdzające występowanie problemu przewymiarowania armatury odmetanowania oraz zwrócono uwagę na konieczność stworzenia algorytmu doboru prawidłowej średnicy kolektora metanowego.

Abstract: The purpose of the article is to compare the dependence of pressure in the methane drainage pipeline to the volume of the mine gas mixture discharged into that pipeline by a single methane collector. The study was conducted on the basis of computer simulation of fluid mechanics in the Ansys Fluent program by creating a measuring network and providing appropriate boundary conditions. The obtained results confirm the problem of oversizing specific parts of the methane drainage pipeline. It is necessary to create an algorithm for selecting the correct diameter of methane collector.

Słowa kluczowe:

odmetanowanie, wentylacja kopalń, numeryczna mechanika płynów, kolektor metanowy

Keywords:

methane drainage, mine ventilation, numerical fluid mechanics, methane collector

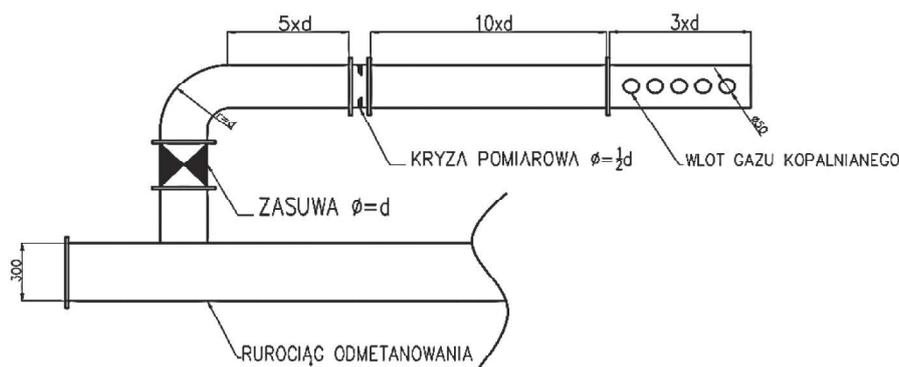
1. Wstęp

Średnia głębokość eksploatacji pokładów węgla kamiennego w Polsce w roku 2018 wynosiła 780 metrów i z każdym rokiem wzrasta przeciętnie o 7 do 8 metrów. Rocznie z górotworu uwalnia się 916,1 milionów m³ metanu, co przy spadającej efektywności odmetanowania wynoszącej 34,6% (35,5% w roku 2017) zmusza do podjęcia działań zapobiegających dalszemu obniżeniu się wskaźnika w celu zapewnienia bezpieczeństwa ruchu zakładów górniczych (Wyższy ... 2018, 2019, Kozubkova 2008). O tym, iż zagrożenie ze strony metanu jest poważne świadczy fakt, iż w latach 2014-2018 miało miejsce w sumie 17 zdarzeń związanych z zapaleniem lub wybuchem metanu, w wyniku których zginęło 6 pracowników kopalń, a 15 innych było ciężko rannych. W parze ze wzrostem głębokości eksploatacji wzrasta również metanonośność

pokładów, która średnio w roku 2018 wynosiła 14,5 m³CH₄/Mg_{C_{sw}}. Prawidłowo funkcjonujący system odmetanowania jest niezbędny dla zapewnienia bezpieczeństwa ruchu zakładów JSW S.A. oraz pomaga ograniczyć negatywny wpływ na środowisko naturalne.

W warunkach Jastrzębskiej Spółki Węglowej stosowany jest ścianowy system eksploatacji pokładów węgla kamiennego z użyciem wentylacji na „U” lub „Y”. Źródłem gazu kopalnianego, rozumianego pod postacią mieszaniny wszystkich gazów ujmowanych w procesie odmetanowania, są otwory drenażowe do stropu oraz spągu eksploatowanych parceli, rurociągi tracone oraz powietrze zza tam izolacyjnych (Szlązak i in. 2015). Wymagania dotyczące sposobu prowadzenia odmetanowania określa rozporządzenie Ministra Energii z dnia 9 czerwca 2017 roku, które stwierdza, iż rurociągi odmetanowania muszą spełniać wymagania normy PN-G-44100 „Rurociągi odmetanowania”. Na podstawie wymienionych aktów prawnych służby kopalniane tworzą

*) Technical University VSB, Ostrava, Czech Republic



Rys. 1. Kolektor metanowy
Fig. 1. Methane collector

projekty odmetanowania, jednak o ile w wyżej wymienionej normie jest określony tok obliczeń minimalnej średnicy rurociągu odmetanowania, o tyle średnica kolektora metanowego jest dobierana, opierając się na osobistym doświadczeniu projektanta. W kopalniach JSW S.A. rozwinęła się metoda podłączania pod depresję otworów odmetanowania przy pomocy gumowych węży, zaworów krzyżowych oraz kolektorów metanowych \varnothing 80, 100 oraz 150 mm wyposażonych w: kryzę pomiarową, odwadniacz oraz zasuwę.

W dostępnej literaturze nie istnieje analityczny sposób doboru średnicy kolektora metanowego, dlatego autorzy w niniejszym artykule przeprowadzili symulację teoretycznej wydajności kolektorów o najczęściej stosowanych średnicach, przy różnych podciśnieniach panujących w rurociągu odmetanowania (rys. 1).

2. Symulacja numeryczna

2.1. Matematyczny opis modelu

Typowe symulowanie przepływów cieczy opiera się na hipotezie Reynoldsa, która zakłada, że współczynniki ruchu turbulentnego można przedstawić jako sumę wielkości uśrednionej po czasie i składowej fluktuacyjnej. Rozbicie prędkości prowadzi do uśrednionych równań ciągłości oraz Naviera–Stokesa, które przy przepływie ustalonym przyjmują następującą wartość (Branny i in. 2013):

Równanie ciągłości:

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Równanie Naviera – Stokesa (Reynoldsa):

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + V_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \overline{v_i v_j} \right] \text{ dla } i,j=1,2,3$$

gdzie:

- $V_i v_i$ – uśrednione i fluktuacyjne składowe wektora prędkości,
- ρ – gęstość płynu,
- P – ciśnienie statyczne,
- ν – współczynnik lepkości kinematycznej,
- $\overline{v_i v_j}$ – tensor naprężeń Reynoldsa.

Tensor naprężeń turbulentnych, który jest dodatkowym członem drugiego równania, sprawia, że układ równań

ciągłości i Reynoldsa jest niezamknięty. Hipotezy zamykające układ obu równań nazywa się modelami turbulencji. Po przeprowadzeniu wstępnych symulacji na siatce o mniejszej gęstości stwierdzono, że wewnątrz kolektora metanowego zachodzi przepływ w pełni turbulentny, a charakterystyczna liczba Reynoldsa dla najniższej prędkości gazu wynosi 47 000. W dostępnej literaturze określa się przepływ wewnątrz rurociągów za w pełni turbulentny w chwili, kiedy $Re > 3000$ (Prywer, Zarzycki 2017). Jako najlepszy dla wybranego zagadnienia, wybrany został model turbulencji k-epsilon z użyciem standardowego modelu tarcia o powierzchni ścian, który w przypadku przepływów turbulentnych w całym przekroju zapewnia dobrą dokładność i zbieżność obliczeń przy stosunkowo niewielkim nakładzie czasu obliczeniowego (Bojko 2008, Kozubkova 2008). W modelu tym naprężenia Reynoldsa są funkcją uśrednionej prędkości deformacji i kinetycznej energii turbulencji:

$$-\overline{\rho v'_i v'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (3)$$

gdzie:

- $\mu_t = C \frac{k^2}{\epsilon}$ – współczynnik turbulენტnej lepkości,
- k – kinetyczna energia turbulencji,
- C – stała modelu,
- δ_{ij} – symbol Kroneckera.

2.2. Geometria modelu

Kolektor metanowy przedstawiony na rys. 1 składa się z kilku części pełniących różne funkcje. Otwory odmetanowania podłączone są do wlotów o średnicy 50 mm za pomocą gumowych węży na początku kolektora, gdzie znajduje się również wyjście na odwadniacz rurowy bądź automatyczny, jednak ze względu na to, że odwadniacz nie ma wpływu na przepływ gazu, nie został on ujęty w modelu. Przed kryzą pomiarową zawężającą średnicę wewnętrzną do połowy średnicy kolektora znajduje się odcinek prosty o długości dziesięciu średnic (rys.1). Jego umiejscowienie ma za zadanie uspokojenie strumienia przed zwężką pomiarową. Podobnie za kryzą pomiarową znajduje się prosty odcinek o długości pięciu średnic kolektora. Dalej w kierunku zgodnym z przepływem zaprojektowano kolano 90° oraz otwartą zasuwę niezawężającą przekroju. Kolektor podłączony jest za pomocą trójnika do stalowego rurociągu odmetanowania o średnicy 300 mm. Ze względu na przestrzenność problemu zdecydowano się na wykonanie trzech modeli trójwymiarowych kolektorów o średnicach najczęściej stosowanych w górnictwie węgla kamiennego.

2.3. Siatka numeryczna MESH

Obszar przepływu dyskretyzowano z wykorzystaniem niestrukturalnej, niejednorodnej siatki obliczeniowej typu czworokątnego. Zbieżność siatki badano za pomocą indeksu GCI (Grid Convergence Index). Testowano dwie siatki o całkowitej liczbie komórek elementarnych wynoszącej około 820 000 i 1 200 000. Porównywano maksymalne i minimalne wartości współrzędnych wektora prędkości w trzech wybranych przekrojach prostopadłych do osi kolektora. W testowanych przekrojach rząd wielkości współczynnika GCI zawierał się w przedziale 10^{-2} - 10^{-3} . Obliczenia wykonano przy użyciu gęstszej siatki numerycznej. Na ściankach modelu zastosowano 10 do 20 warstw inflacji o wysokości pierwszej komórki tak dobranej, aby współczynnik y^+ na ścianach zawierał się w przedziale 50-250. Jest to wartość zalecana w przypadku użycia standardowej funkcji ściany w modelu k-epsilon (Bojko 2008, Kozubkova 2008).

2.4. Warunki brzegowe

W większości przypadków kolektor metanowy umiejscowiony jest w chodniku odprowadzającym zużyte powietrze ze ściany, gdzie depresja wentylatora głównego wytwarza najniższe ciśnienie w całym rejonie (Qin i in. 2015). Sytuacja taka powoduje ruch gazu w górotworze w kierunku wyrobiska górniczego. W takim układzie po wykonaniu otworu odmetanowania metan często samoczynnie wypływa z rury obsadowej, jeśli ta nie jest zabezpieczona odpowiednim zaworem krzyżowym lub zasuwą. Z tego względu dla uproszczenia modelu autorzy przyjęli założenie braku oporów przepływu gazu z otworu do kolektora odmetanowania, ponieważ gaz niejako samoczynnie migruje ze zrobów do punktu o niższym potencjale. W modelu na miejscu podłączania gumowych węży wiodących do otworu odmetanowania ustalono warunki brzegowy *pressure inlet* 0,0 Pa, współczynnik turbulencji 5%, przyjęty na podstawie literatury dla nagłej zmiany średnic (Kozubkova 2008) oraz średnicę hydrauliczną 0,05 m. Mieszanina gazów zasysanych przez kolektor nieustannie się

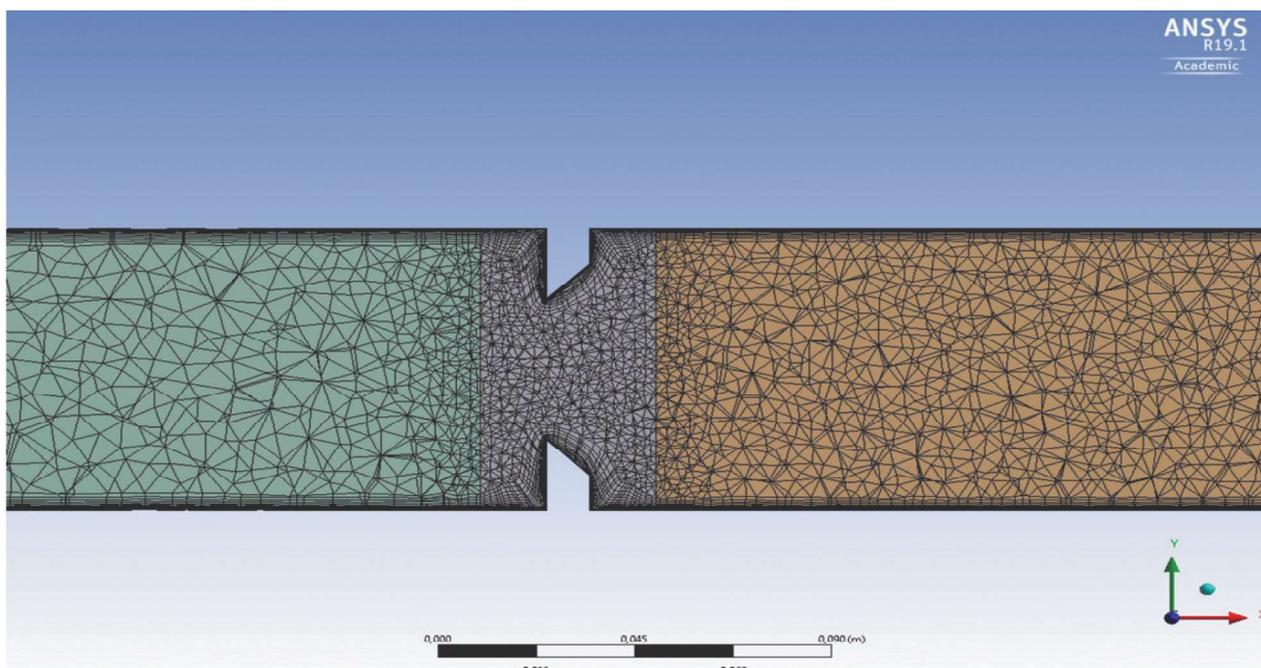
zmienia pod wpływem wielu czynników, takich jak: wielkość wydobycia, ciśnienie atmosferyczne czy aktualny stan sieci wentylacyjnej. Temperatura wlotowa gazu kopalnianego ustalona została na 37°C, co odpowiada średniej temperaturze pierwotnej skał na głębokości 1000 m w kopalniach JSW S.A. Dla potrzeb symulacji w programie ANSYS Fluent przyjęto skład gazu kopalnianego przedstawiony w cytowanej literaturze (Nawrat 2006):

- CH₄ - 50%
- N₂ - 38,44%
- O₂ - 7,805%
- CO₂ - 3,75%
- CO - 0,005%

Z uwagi na wysokie prędkości przepływu mieszaniny użyto ściśliwego modelu gazu idealnego. Wnętrze kolektorów często ulega korozji, toteż zastosowano wysoką chropowatość ścian w funkcji *wall roughness height* równą 0,005 m. Dołowe rurociągi metanowe w założeniu są rurociągami depresyjnymi. Oznacza to, iż w ich wnętrzu panuje ciśnienie niższe od ciśnienia powietrza kopalnianego w wyrobisku. Osiągane jest to za pomocą dmuchaw pracujących w stacji odmetanowania. Projekty odmetanowania ścian w JSW S.A. zakładają minimalne podciśnienie w miejscu ujęcia mieszaniny wynoszące 30 mmHg, dlatego w modelu numerycznym jest to minimalne podciśnienie ujęte w symulacji. Kolejno wykonano obliczenia dla podciśnienia o wartości od 30 do 90 mmHg z podziałką 15 mm dla kolektorów Ø80, 100 oraz 150 mm. Na najodleglejszym przekroju rurociągu metanowego Ø300 mm, do którego podłączony jest badany kolektor metanowy ustanowiono warunek graniczny *pressure outlet*.

3. Wyniki obliczeń

Symulację z wykorzystaniem komputerowej mechaniki płynów wykonano w programie ANSYS Fluent w wersji 19.1, który umożliwia przeprowadzanie skomplikowanych analiz na komputerach klasy PC z jednym lub wieloma procesorami. Obliczenia wykonano w czasie ciągłym osiągając minimalną



Rys. 2. Przekrój siatki numerycznej w okolicach kryzy pomiarowej
Fig. 2. Cross-section of the numerical grid around the measuring orifice

względną różnicę pomiędzy dwoma kolejnymi iteracjami na poziomie $>1^{-5}$, co wymagało w zależności od średnicy kolektora i prędkości przepływu mieszaniny przeprowadzenia od 1200 do 2400 cykli obliczeniowych. Wyniki przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki symulacji
Table 1. Simulation results

Podciśnienie [mmHg]	Strumień objętościowy mieszaniny w zależności od średnicy kolektora [m^3/min]		
	80 mm	100 mm	150 mm
30	4,73	9,79	17,92
45	5,33	12,22	23,22
60	6,91	13,17	25,12
75	7,77	15,23	29,98
90	8,75	16,36	33,52

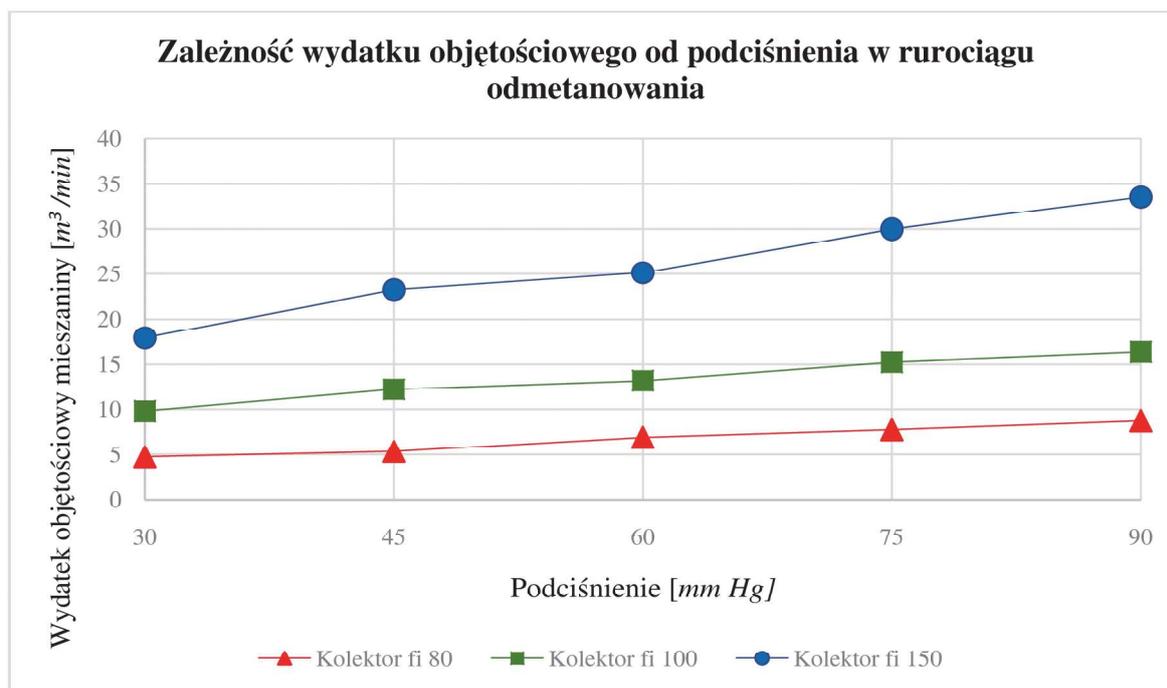
Zgodnie z wcześniejszymi założeniami ilość odprowadzanego gazu zwiększa się wraz ze wzrostem podciśnienia panującego w rurociągu odmetanowania. Wzrost nie jest jednak liniowy ze względu na to, że podczas w pełni turbulentnego przepływu opór związany między innymi z siłą tarcia o ścianki kanału jest wprost proporcjonalny do drugiej potęgi prędkości przepływającego gazu (Prywer, Zarzycki 2017). Wraz ze wzrostem średnicy kolektora metanowego, przy tym samym podciśnieniu, ilość przepływającej mieszanki gazów rośnie w sposób wykładniczy. Graficzna prezentacja zależności podciśnienia od natężenia przepływu kształtuje się w sposób przedstawiony na (rys. 3).

Na poniższej grafice, na płaszczyźnie znajdującej się w osi kolektora metanowego $\varnothing 80$ przedstawiono pole prędkości oraz ciśnienie. W tym przypadku zastosowano kryzę pomiarową 80/40 mm o kącie stożkowym 45 stopni. Zgodnie z teorią pomiarów natężenia przepływu gazu przez zwężki widoczna jest wyraźnie różnica ciśnień przed i za kryzą,

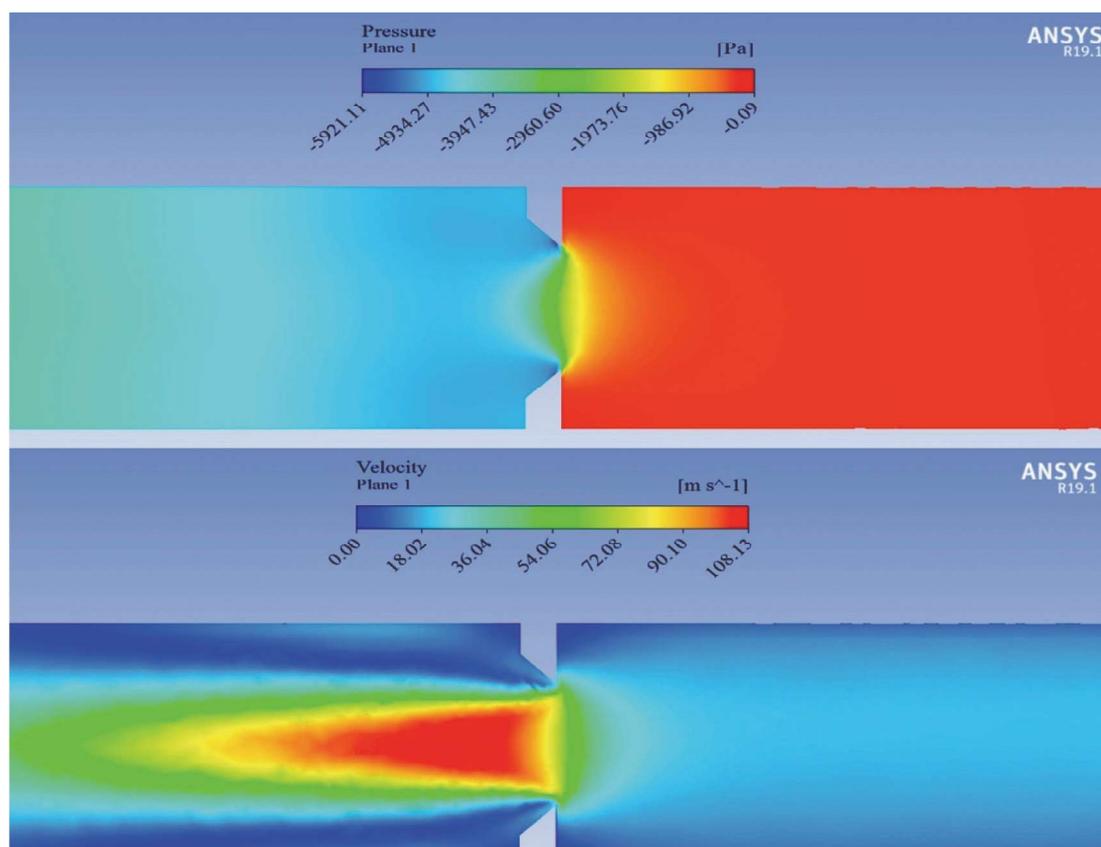
(Prywer, Zarzycki 2017). Dobrze widoczne jest również zjawisko zmniejszania prędkości przepływu w bliskości ścian przewodu.

4. Podsumowania i wnioski

Obecna sytuacja, gdy nie istnieje metoda analityczna doboru średnicy kolektora metanowego, doprowadza do nagminnego przewymiarowania armatury metanowej. Często w użyciu pozostają kolektory o średnicy 150 mm, których przekrój wewnętrzny jest niemożliwy do pełnego wykorzystania w większości przypadków. Skutkuje to tym, że zasuwą zainstalowana na armaturze zamykana jest przez personel pomiarowy pozostawiając 10-20% pierwotnego przekroju kolektora. Zastosowanie mniejszych kolektorów w dobrej koncentracji wydobywania znacznie zmniejszyłoby pracochłonność procesu odmetanowania oraz zredukowałoby jego koszty. Wprowadzając wymianę kolektora $\varnothing 150$ mm na kolektor $\varnothing 80$, otrzymujemy armaturę ponad 40% lżejszą oraz skracamy jej długość, poprzez zmniejszenie wymaganych odcinków pomiarowych ujętych na rys. 1 o 1260 mm. Przedstawiona symulacja po przeprowadzeniu eksperymentalnych testów w warunkach dołowych może być podstawą stworzenia algorytmu wyboru prawidłowej średnicy kolektora wykorzystywanego w projektach odmetanowania przez służby wentylacyjne zakładów górniczych. Zakładając średnią metanowość bezwzględną wyrobiska ścianowego na poziomie $30m^3/min$ oraz średnią efektywność odmetanowania 34,6% (Wyższy ... 2018, 2019, Szlązak i in. 2015), otrzymujemy ujęcie $10,38m^3/min$ czystego CH_4 do systemu odmetanowania, co przy założeniu koncentracji CH_4 w wysokości 45% (Nawrat 2006), daje $23,07m^3/min$ mieszaniny. Oznacza to, iż w przypadku przeciętnej ściany węglowej w warunkach JSW S.A., która posiada średnio 6 aktywnych zbiorów wachlarzowych otworów odmetanowania, jeden kolektor przyjmuje w założeniu równomiernego rozkładu intensywności wydzielania, średnio $3,84m^3/min$ mieszaniny CH_4 oraz pozostałych gazów



Rys. 3. Graficzne przedstawienie wyników symulacji
Fig. 3. Graphic representation of simulation results



Rys. 4. Pole ciśnienia (u góry) oraz prędkości (na dole) dla kolektora \varnothing 80 przy podciśnieniu 30 mmHg
Fig. 4. Pressure (top) and velocity (bottom) for collector diameter 80 at 30 mmHg vacuum

składających się na gaz kopalniany. Zgodnie z wynikami symulacji w normalnych warunkach, zapewniając najniższe podciśnienie zgodne z wymaganiami projektu odmetanowania, jesteśmy w stanie odprowadzić wydzielający się gaz kolektorem o średnicy 80 mm.

Symulacje komputerowej mechaniki płynów coraz częściej znajdują zastosowanie w rozwiązywaniu problemów spotykanych w aerologii, a także innych zagadnieniach związanych z przepływem gazów lub płynów (Ren i in. 2001). Celem artykułu oprócz przyczynku do powstania metody doboru prawidłowych średnic kolektorów metanowych jest także zwrócenie uwagi na przewymiarowanie armatury, co wynika nie tylko z symulacji CFD, ale również z praktyki autorów w ruchu zakładów górniczych. W obecnej sytuacji, kiedy metan ujęty w procesie odmetanowania staje się cennym surowcem energetycznym, każde działanie prowadzące do zwiększenia efektywności odmetanowania lub zmniejszenia jego kosztów pozytywnie wpływa nie tylko na bezpieczeństwo zakładu górniczego, ale także na jego końcowy wynik ekonomiczny. Ograniczenie przewymiarowania armatury metanowej bez wątplenia wpłynęłoby pozytywnie na proces jako całość.

Literatura

BOJKO M., 2008 - Guide for Training of Flow Modeling – FLUENT. Ostrava: VSB - Technical University of Ostrava (skrypt uczelniany).
 BRANNY M., KARCH M., WODZIAK W., JASZCZUR M., NOWAK R.,

SZMYD J. 2013 - Eksperymentalna weryfikacja modeli CFD stosowanych w wentylacji kopalń. „Przeгляд Górnicy” nr 5, s. 73-82.
 KOZUBKOVÁ M. 2008 - Modelování proudění tekutin FLUENT, CFX. Ostrava: VSB - Technical University of Ostrava (skrypt uczelniany).
 NAWRAT S., KUCZERA Z., ŁUCZAK R., ŻYCZKOWSKI P. 2006 - Problemy zapewnienia stabilnych parametrów paliwa z odmetanowania kopalń stosowanego do silników gazowych. „Górnictwo i Geoinżynieria” nr 3, s. 19-35.
 PRYWER J., ZARZYCKI R. 2017 - Techniczna mechanika płynów. Wydawnictwo Naukowe PWN.
 QIN Z., YUAN L., GUO H., QU Q. 2015 - Investigation of longwall goaf gas flows and borehole drainage performance by CFD simulation. International Journal of Coal Geology, Vol. 150, s. 51-63.
 REN T., EDWARDS J., WHITTLES D., REDDISH D. 2001 - Firedamp drainage optimization using geotechnical and CFD modelling techniques. 29th International Symposium on Computer Applications in the Minerals Industries. s. 549-554. Beijing, People's Republic of China.
 SZŁĄŻAK N., BOROWSKI D., SWOLKIEN J. 2015 - Ocena efektywności odmetanowania górotworu przy eksploatacji pokładu ścianą z podwójnym chodnikiem wentylacyjnym. „Przeгляд Górnicy” nr 2, s. 79-86.
 Wyższy Urząd Górniczy 2018 - Ocena stanu bezpieczeństwa pracy, ratownictwa górniczego oraz bezpieczeństwa powszechnego w związku z działalnością górnictwo-geologiczną w 2017 roku. WUG, Katowice.
 Wyższy Urząd Górniczy 2019 - Ocena stanu bezpieczeństwa pracy, ratownictwa górniczego oraz bezpieczeństwa powszechnego w związku z działalnością górnictwo-geologiczną w 2018 roku. WUG, Katowice.

Artykuł wpłynął do redakcji – marzec 2020
 Artykuł akceptowano do druku – 30.04.2020