



<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMTECH2021.12>

Analiza ruchów powietrza w trakcie mijania się naczyń wyciągowych w aspekcie ich wpływu na zużycie zbrojenia szybowego, bezpieczeństwo i komfort jazdy

Jerzy Kwaśniewski – Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

Maciej Jagodziński – Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

Streszczenie: W rozdziale przedstawiono analizę symulacyjną CFD ruchu powietrza w trakcie mijania się naczyń wyciągowych oraz jego wpływów na zbrojenie szybowe, bezpieczeństwo i komfort jazdy ludzi. Po zawarciu krótkiego wstępu wyjaśniającego cel i zakres prowadzonych badań, przedstawiono zagadnienia teoretyczne związane z rozpatrywanym problemem. Ponadto, zilustrowano badany obiekt, czyli naczynia wyciągowe funkcjonujące w środowisku szybowym (szyb „Kolejowy” ZKWK „Guido”), na podstawie których opracowano dwuwymiarowy model geometryczny zaimplementowany do obliczeń numerycznych. Analizę wykonano przy użyciu symulacji numerycznych CFD w środowisku Ansys Fluent. W rozdziale zaprezentowano proces powstawania modelu siatki elementów skończonych wraz z oceną ich jakości, wybraną metodą przybliżeń iteracyjnych, nałożone warunki brzegowe do przeprowadzanych symulacji oraz otrzymane wyniki, które kolejno przeanalizowano i podsumowano.

Słowa kluczowe: górnictwo, górnice wyciągi szybowe, naczynia wyciągowe, zbrojenie szybowe symulacja CFD

The analysis of air movement during the passing of skips and cages in terms of mine shaft reinforcement wear, safety and comfort of traveling

Abstract: The chapter presents the analysis of air movement during the passing of cages and its influence on the mine shaft reinforcement, safety, and comfort of traveling. After concluding a short introduction to the purpose and scope of the research, the theoretical issues associated with the analysing problem were introduced. In addition, the test object (mining cage in the mine shaft “Kolejowy” ZKWK “Guido”) was illustrated. Based on the test object, the 2- dimensional geometric model was developed. The analysis was done with CFD numerical simulation (Ansys Fluent environment). In the chapter, the process of generation of the finite element mesh model (with quality check), the selected method of iterative approximation, the imposed boundary conditions to simulation, and the results were introduced.

Keywords: mining shaft, mine shaft hoists, skips and cages, mining shaft reinforcement, CFD simulation

1. Wprowadzenie

Przemysł górniczy to jeden z największych sektorów gospodarczych w Polsce. Kopalnie węgla kamiennego regularnie wydobywają około 60 mln ton rocznie pomimo coraz liczniejszych działań likwidacyjnych oddziałów [1]. Wiele likwidowanych kopalni jest przekształcanych w pompownie, a nieznaczna część obiektów przekształcana w kopalnie zabytkowe (np. Kopalnia Soli Wieliczka, Kopalnia Soli Bochnia czy Zabytkowa Kopalnia Węgla Kamiennego Guido). Co ważne, wielkość branży górniczej w kontekście jej istotności gospodarczo-energetycznej oraz zauważalny stały rozwój techniczny obliuguje konstruktorów do poszukiwania nowych rozwiązań technicznych w zakresie zwiększonych wydajności stosowanych urządzeń, większych wytrzymałości czy dłuższych żywotności eksploatacyjnej.

W skład całego zakładu górniczego wchodzi wiele maszyn, urządzeń oraz konstrukcji, które tworzą ściśle powiązany ze sobą układ. Niewątpliwie, jednym z najbardziej podstawowych elementów wspomnianego układu są szyby górnicze wraz z całą jego infrastrukturą – maszynami wyciągowymi,

naczyniami, zbrojeniem szybowym czy przedziałami drabinowymi oraz rurowo-kablowymi. Szyby wymagają znacznego nakładu finansowego (w przekroju całego okresu budowy, eksploatacji oraz ewentualnej likwidacji) na ich utrzymanie oraz specjalistycznej kadry pracowniczej. Znaczna część prac związanych z budową szybu oraz utrzymaniem ruchu maszyny wyciągowej należą do prac szczególnie niebezpiecznych i trzeba je wykonywać pod nadzorem osoby dozoru ruchu [2].

W związku z powyższym, utrzymanie ruchu w szybie górniczym jest niezwykle istotne dla poprawnego funkcjonowania kopalni – niezależnie czy mowa o szybie wydobywczym, transportowym czy turystycznym. Prawidłowe działanie urządzeń wyciągowych bezpośrednio wpływa na ilość wydobytego urobku, możliwość przetransportowania brygady pracowniczej czy też turystów na wskazane poziomy. Wydaje się zatem, iż redukcja liczby potencjalnych postojów maszyny wyciągowej wskutek nieprzewidzianych zdarzeń jest wskazana i niezwykle istotna z punktu widzenia poprawnego działania całego zakładu górniczego.

Do możliwych powodów wstrzymania ruchu w szybie kopalnianym należą przede wszystkim remonty infrastruktury szybowej, takie jak modernizacje rurowościów szybowych (w całości bądź ich fragmentów), wymiana trasy kablowej (wraz z opuszczaniem kabla) czy też regeneracje analizowanego w niniejszym opracowaniu zbrojenia szybowego [3]. Zbrojenie szybowe jako złożona konstrukcja, poddawana jest działaniom sił pochodzącym przede wszystkim od górniczych naczyń wyciągowych, które ze względu na luzy między rolkami naczynia a prowadnikami, poruszają się nie tylko równolegle, lecz również, w nieznacznym zakresie, prostopadle do kierunku przemieszczania się. Na intensywność oraz częstotliwość występowania niepożądanych ruchów poprzecznych naczynia podczas jego jazdy wpływać może między innymi prędkość poruszania się naczynia, która wraz ze wzrostem powodować może powstawanie turbulentnych zawirowań powietrznych wokół klatki czy skipu.

Dlatego też, chcąc zweryfikować wpływ ruchów powietrza powstających wokół naczyń wyciągowych na zbrojenie szybowe, przeprowadzono badania symulacyjne zachowania się powietrza podczas przemieszczania się naczyń w przeciwnych zwrotach z wykorzystaniem środowiska CFD (Ansys Fluent).

Ponieważ zderzenie się dwóch mas powietrza poruszających się o przeciwnych zwrotach może wywołać powstanie turbulentnych zawirowań, założono, że szczyt intensywności powstających burzliwych ruchów powietrza przypada na moment mijania się naczyń wyciągowych w szybie górniczym.

2. Zagadnienia teoretyczne

Rozpatrując problemy związane z analizą ruchu powietrza, rozważania należy rozpocząć od jednego z podstawowych zagadnień mechaniki płynów, jakim jest *równanie Naviera- Stokesa* (N-S). Zależność N-S to ogólne równanie ruchu płynu rzeczywistego, które zapisać można w formie ogólnej [4]:

$$\frac{dv_x}{dt} = X - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) + \frac{\nu}{3} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \quad (1a)$$

$$\frac{dv_y}{dt} = Y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) + \frac{\nu}{3} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \quad (1b)$$

$$\frac{dv_z}{dt} = Z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) + \frac{\nu}{3} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \quad (1c)$$



lub w formie wektorowej:

$$\rho \cdot \frac{D\bar{u}}{Dt} = \rho \bar{f} - \text{grad}p + \text{grad}(\lambda \text{div}\bar{u}) + \text{div}(2\mu[D]) \quad (1d)$$

$$A = B + C + D + E$$

gdzie:

A – prędkość zmiany pędu płynu,

B – siła masowa,

C – siła powierzchniowa ciśnienia,

D – siła powierzchniowa związana z lepkością płynu, która wynika ze zmiany objętości płynu ściśliwego,

E – siła powierzchniowa związana z lepkością płynu, która wynika z deformacji postaciowej i liniowej płynu [5].

Równania N-S (2a-d) mają charakter nieliniowy, co oznacza to, iż są one niezwykle trudne do rozwiązania analitycznego (równanie N-S można uprościć poprzez założenie o braku lepkości i nieściśliwości płynu, otrzymując równania Eulera) [4]. W związku z tym, by rozwiązać równania ruchu płynu rzeczywistego Naviera- Stokesa, najczęściej wykorzystuje się metody obliczeniowe, pozwalające na otrzymanie wyników z zadowalającym przybliżeniem, takie jak:

- Direct Numerical Simulation (DNS) – numeryczne rozwiązanie pełnych i niestabilnych równań N-S nie wymagające modelowania, niezwykle energochłonne,
- Large Eddy Simulation (LES) – numeryczne rozwiązanie przefiltrowanych równań N-S,
- Reynolds Averaged Navier- Stokes Simulation (RANS) – numeryczne rozwiązanie czasowo uśrednionych równań N-S, które docelowo wykorzystano w analizowanym problemie.

Podane powyżej metody numeryczne dotyczą zagadnień przepływów wewnętrznych o charakterze turbulentnym. W celu scharakteryzowania rodzaju przepływu stosuje się kryterium *liczby Reynoldsa*, oznaczone wzorem:

$$Re_L = \frac{\rho \cdot U \cdot L}{\mu} \quad (2)$$

gdzie:

ρ – gęstość płynu, $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$,

U – prędkość płynu, $\left[\frac{m}{s}\right]$,

L – wielkość referencyjna analizowanego elementu, $[m]$,

μ – lepkość dynamiczna płynu, wyrażona wzorem $\left[\frac{kg}{m \cdot s}\right]$:

$$\mu = \mu_0 \cdot \frac{385}{(T_{oto} + 112)} \cdot \left(\frac{T_{oto}}{273}\right)^{1,5} \quad (3)$$

gdzie:

μ_0 – lepkość dynamiczna powietrza w temperaturze $t = 0^\circ C$, $\left[\frac{kg}{m \cdot s}\right]$,

T_{oto} – temperatura otoczenia, $[K]$,

Należy zaznaczyć, iż w analizach przepływów wewnętrznych płyn przybiera charakter burzliwy, jeżeli [6]:

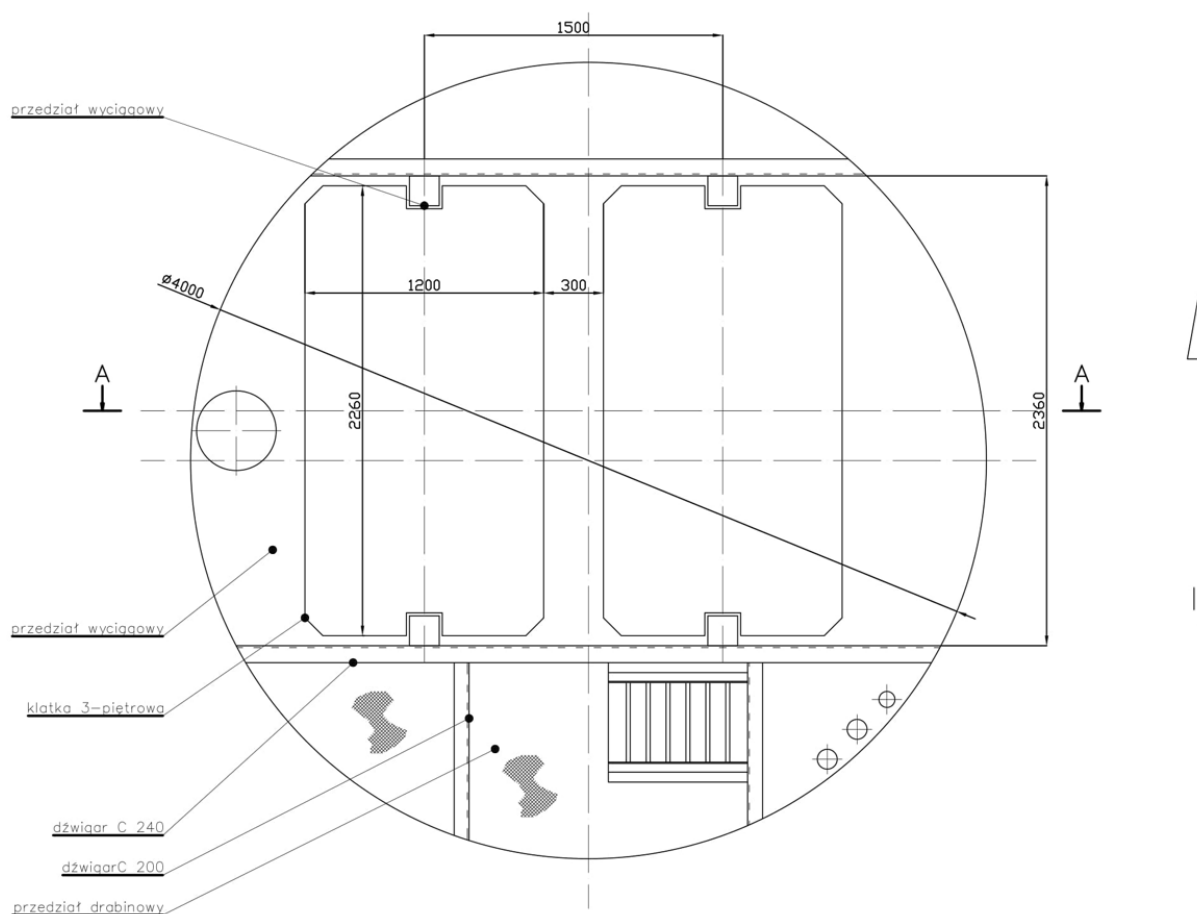
$$Re_L > 2300$$

3. Badany obiekt i model geometryczny

W celu przeprowadzenia symulacji numerycznej CFD sytuacji mijania się naczyń wyciągowych, wykonano modele klatek wielkogabarytowych funkcjonującej w szybie „Kolejowy” ZKWK „Guido”.

Szyb „Kolejowy” jest szybem jednoprzędziałowym, wdechowym o głębokości 336,6 m i średnicy 4,0 m. Ze względu na stosunkowo niewielkie pole przekroju tarczy szybu (rys. 1), obiekt ten dobrze koreluje z rozpatrywanym problemem.

Ze względu na stosunkowo duży udział procentowy klatek wielkogabarytowych w polu powierzchni tarczy szybu „Kolejowy” (około 43%), w chwili mijania się naczyń, powietrze „wypychane” jest przez naczynia w pozostałą przestrzeń szybu. Wywołuje to powiększony, lokalny efekt tłoka powietrznego – klatka spręża masę powietrza na kierunku jazdy, co wiąże się z powstawaniem stref podciśnieniowych wokół naczynia [7]. Potencjalnie, wyżej opisane zjawisko może dodatkowo uwidocznić wpływ burzliwych ruchów powietrza wokół mijających się klatek.



Rys. 1. Tarcza szybu „Kolejowy” ZKWK „Guido”

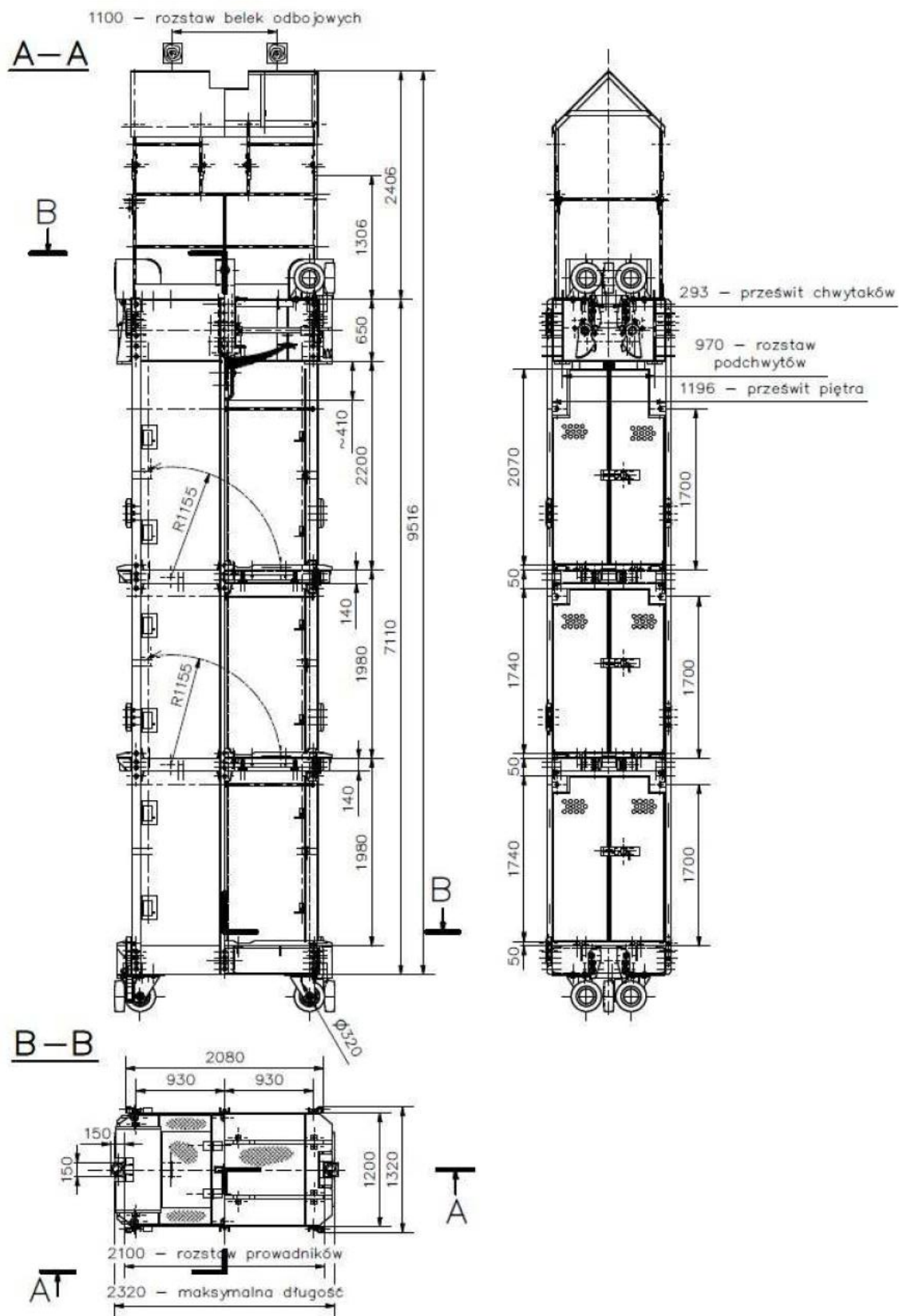
Z uwagi na turystyczną charakterystykę kopalni, w szybie „Kolejowy” funkcjonują dwie 3-piętrowe klatki wielkogabarytowe z łapadłami przeznaczone do jazdy ludzi, transportu materiałów



(w tym materiałów długich do 6 m) poruszające się z prędkością do 4 m/s. Klatka wielkogabarytowa została przedstawiona na rysunku 2.

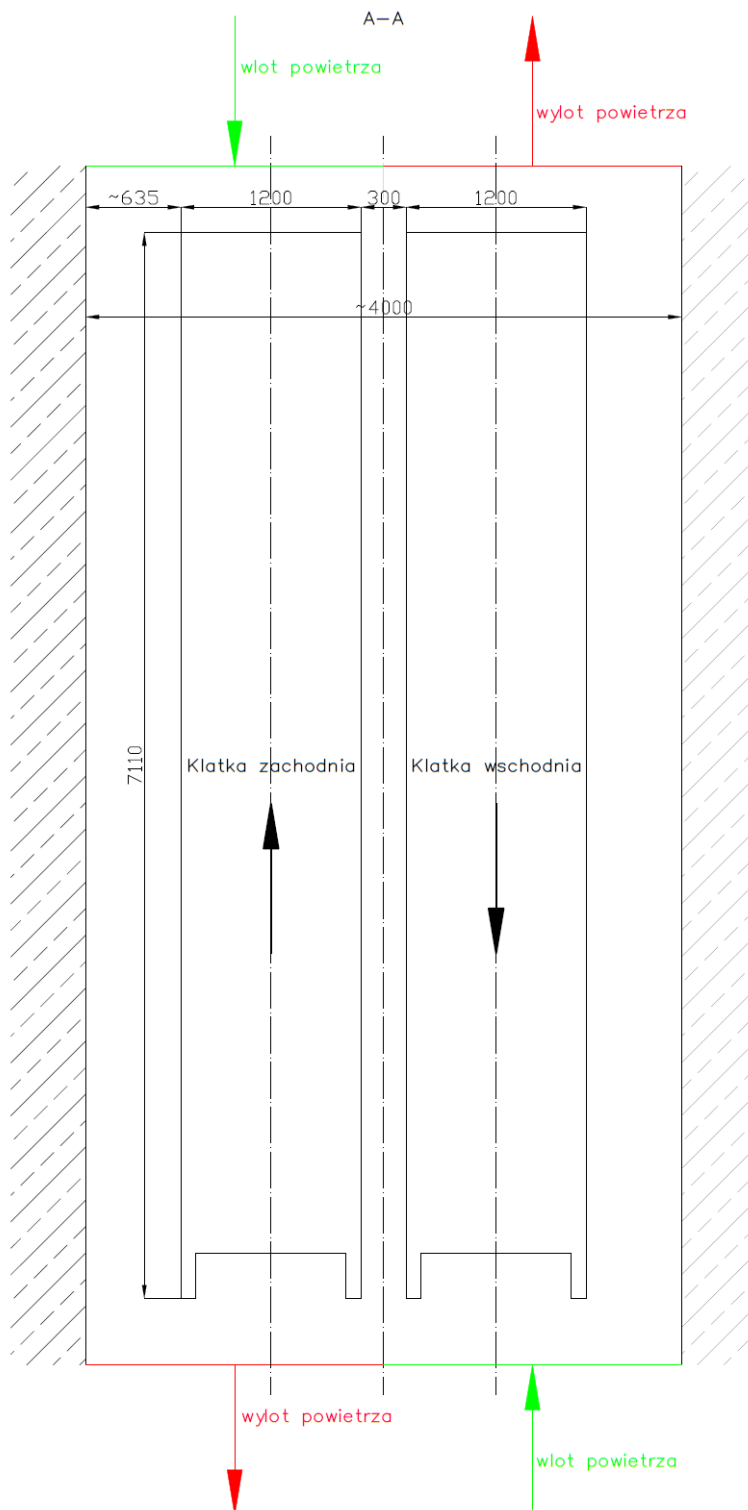
Do symulacji CFD przeprowadzonej w programie *Ansys Fluent* przyjęto uproszczony, dwuwymiarowy model, na który składa się wycinek szybu wraz z naczyniami wyciągowymi, zgodny z przekrojem A-A zaznaczonym na rysunku 1. Na model geometryczny nałożono poniższe uproszczenia:

- w modelu szybu pominięto jego wyposażenie ze względu na analizę zachowania powietrza wyłącznie w przedziale wyciągowym (rurociągi, kable, przedział drabinowy nie mają znaczącego wpływu na symulację),
- klatki wielkogabarytowe uproszczono do ogólnych zarysów zewnętrznych konstrukcji (elementy wewnętrzne naczynia nie oddziałują w znacznym stopniu na ruch powietrza),
- w symulacji pominięto dodatkowe ruchy powietrza wynikające z wentylacyjnej funkcji szybu (szyb wdechowy).



Rys. 2. Konstrukcja 3-piętrowej klatki wielkogabarytowej funkcjonującej w szybie „Kolejowy” [8]

Model geometryczny przyjęty do symulacji numerycznej wraz z głównymi wymiarami oraz z przyjętymi zwrotami przemieszczania się naczyni wyciągowych (oraz masami powietrza) został przedstawiony na rysunku 3. Podczas tworzenia geometrii, nadano właściwym konturom nazwy pozwalające na ich identyfikację w fazie nadawania warunków brzegowych do symulacji np. „inlet” – wlot powietrza, „outlet” – wylot powietrza, „wall” – obmurze szybu itd.



Rys. 3. Model geometryczny klatek wielkogabarytowych w wycinku szybu

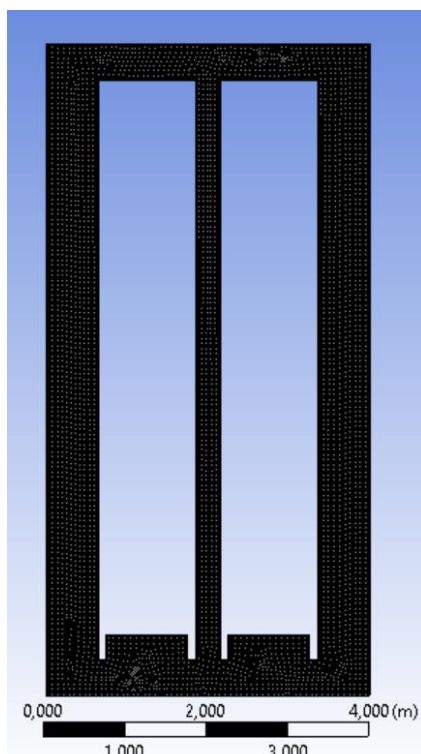
4. Metodologia badania

Badanie symulacyjne mijania się naczyń wyciągowych w szybie przeprowadzono przy użyciu środowiska *Ansys Fluent* oraz jego wewnętrznego pakietu *Workbench 2021 R1*. W celu przeprowadzenia symulacji, należy wykonać tzw. *pre processing* – szereg czynności związanych z przygotowaniem modelu geometrycznego, siatki oraz ustawieniami kalkulacji numerycznej. Po przeprowadzonym badaniu należy przeprowadzić tzw. *post processing*, czyli wydobyć otrzymanych wyników w formie wartości liczbowych czy grafiki.

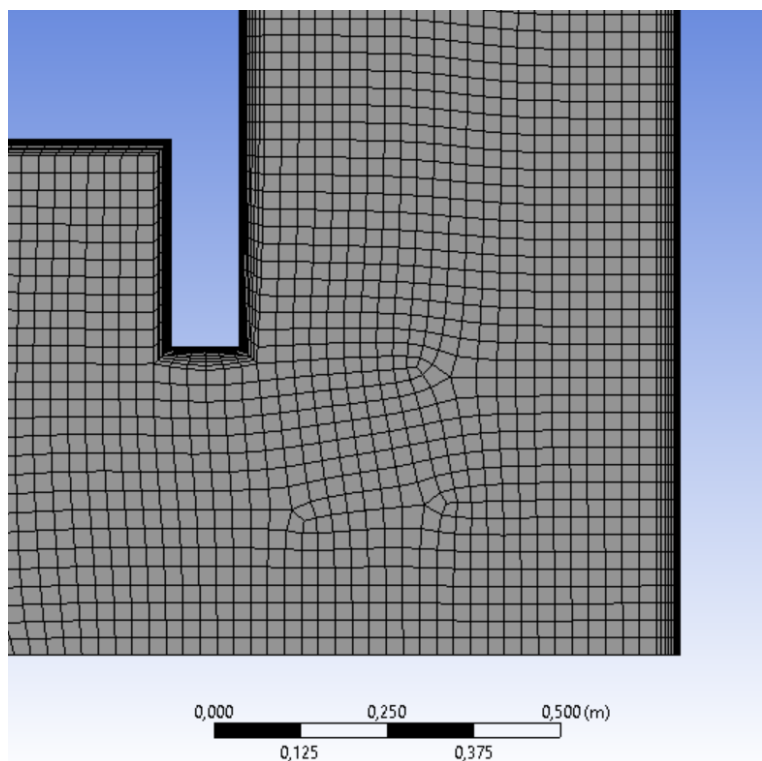
4.1. Przygotowanie do symulacji

Pre processing rozpoczęto od opracowania modelu geometrycznego badanego obiektu, czyli naczyń wyciągowych eksploatowanych w szybie „Kolejowy” ZKWK „Guido”. Model został opisany w punkcie 3. niniejszego rozdziału.

Kolejny krok przygotowawczy polegał na wygenerowaniu siatki za pomocą modułu *Mesh*. Wygenerowana siatka została utworzona z kwadratów (dwuwymiarowa metoda *Hex Dominant*) o wielkości 25 mm, co łącznie przełożyło się na 42054 elementów. Dodatkowo, siatkę zagęszczono przy krawędziach brzegowych modelu geometrycznego, co pozwoliło na dokładniejszą weryfikację ruchu powietrza wokół naczynia oraz przy obudowie szybu (funkcja *Inflation*). Siatkę przedstawiono na rysunkach 4 i 5.



Rys. 4. Widok siatki analizowanego modelu geometrycznego



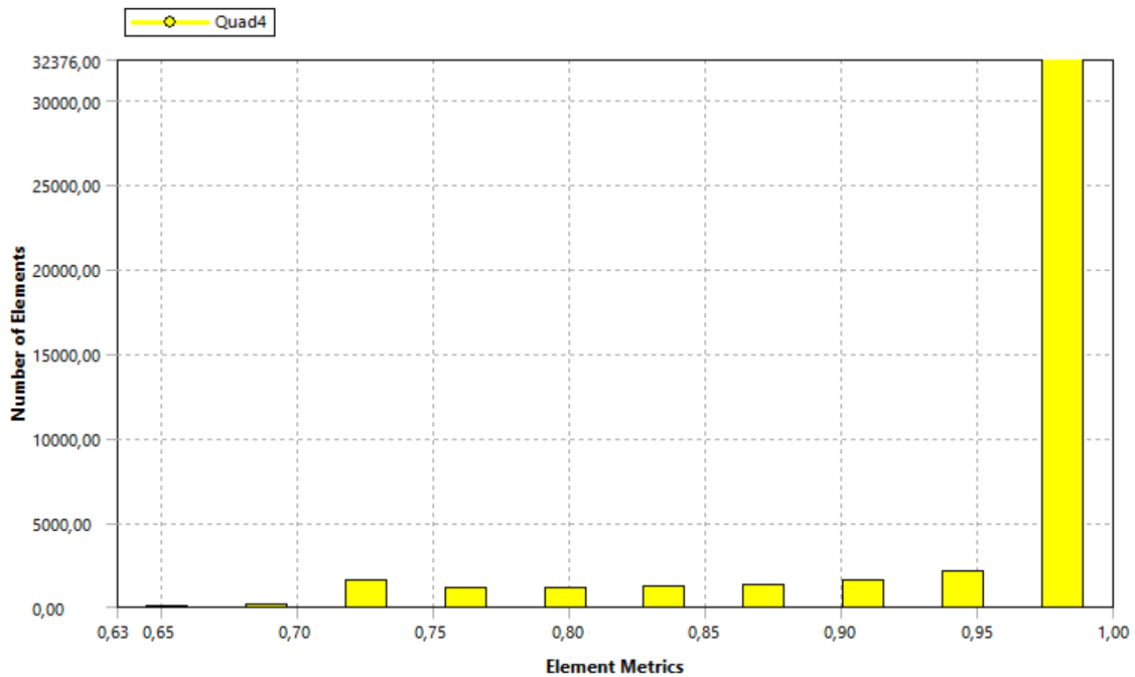
Rys. 5. Szczegół siatki przedstawiający zagęszczenie siatki przy krawędziach brzegowych modelu geometrycznego

Siatka została zweryfikowana jakościowo dwiema metodami, były to:

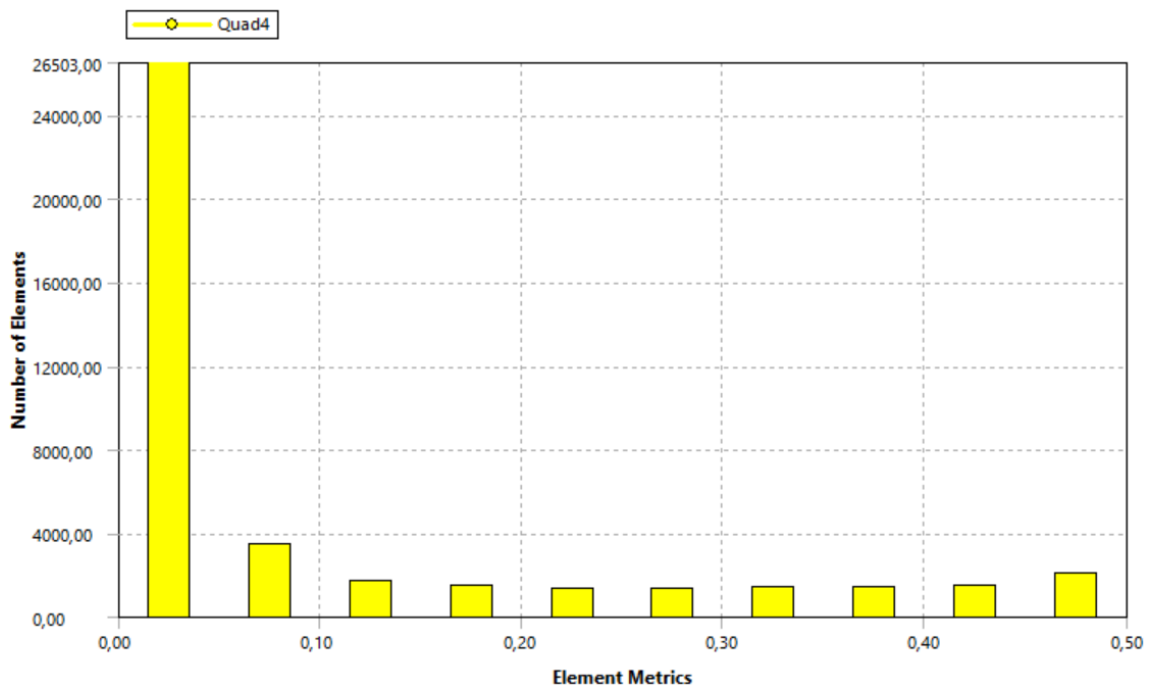
- Ortogonalność (*orthogonal quality*) – stosunek iloczynu wektora normalnego do krawędzi elementu oraz wektora łączącego środek ciężkości elementu ze środkiem krawędzi do iloczynu wartości bezwzględnych ww. wektorów. Ocena jakości siatki mieści się w zakresie od 0 (siatka słabej jakości) do 1 (siatka doskonałej jakości) [9],

- Skośność (*skewness*) – odchylenie kątów w bryle. Ocena jakości siatki mieści się w zakresie od 0 (siatka doskonałej jakości) do 1 (siatka słabej jakości) [10].

Na poniższych wykresach przedstawiono uzyskaną jakość siatki metodami *orthogonal* oraz *skewness* (odpowiednio rysunek 6 oraz rysunek 7).



Rys. 6. Wykres zależności pomiędzy liczbą elementów a ich ortogonalnością.
Średnia wartość ortogonalności rozpatrywanej siatki: 0,96



Rys. 7. Wykres zależności pomiędzy liczbą elementów a ich skośnością.
Średnia wartość skośności rozpatrywanej siatki: 0,10



Ostatnią fazę *pre processingu* rozpoczęto od uruchomienia docelowego modułu *Fluent*, w którym możliwe jest ustawienie parametrów przeprowadzanych kalkulacji numerycznych.

Ze względu na skorzystanie z metody RANS (punkt 2. niniejszego rozdziału), konieczny jest wybór właściwego modelu turbulentnego. Do przeprowadzanej analizy skorzystano z modelu jednorównaniowego Spalart-Allmaras. Model ten, poprzez zastosowanie wyłącznie jednego równania ruchu płynu, odznacza się ekonomicznością obliczeniowo-czasową, zachowując wysoką dokładność w badaniach przepływów przyściennych poddanych niekorzystnym gradientom ciśnienia [6]. Zważywszy na analizę wzajemnego oddziaływania nieznacznie oddalonych od siebie naczyń wyciągowych (istotne zachowanie płynu przy krawędziach granicznych geometrii), model Spalart-Allmaras wydaje się dobrze wpisywać w analizowany problem.

Po wybraniu właściwego modelu jako medium opływające klatkę wyznaczono powietrze.

Ustawienia warunków brzegowych przeprowadzono zgodnie ze schematem ruchu powietrza przedstawionym na rysunku 3. Klatka zachodnia (znajdująca się po lewej stronie) porusza się w górę, a klatka wschodnia (znajdująca się po prawej stronie) w dół, w związku z czym powietrze w modelu wtłaczane jest z góry dla klatki zachodniej oraz od dołu dla klatki wschodniej (*boundary conditions – inlet*). Ze względu na dopuszczalną prędkość jazdy naczyń oraz zakładając pominięcie dodatkowych ruchów powietrza wynikających z wentylacji podziemnych przekopów kopalni (szyb wdechowy), ustalono prędkość wpływu powietrza do wycinka szybu na 4 m/s (*inlet – velocity magnitude*). Aby odwzorować naturalne zachowanie się powietrza w szybie, przewidziano symulację wypływu powietrza z rozpatrywanej geometrii przy użyciu funkcji *outlet*. Pozostałe krawędzie geometrii zostały potraktowane jako ściany (*boundary conditions – wall*).

Ze względu na analizę zachowania się powietrza naciskającego z pewnym ciśnieniem na klatki, przewidziano włączenie obserwacji zbieżności kolejnych iteracji parametru siły oporu jakie stawiają ściany modelu, co pomaga w weryfikacji poprawności przeprowadzanych symulacji numerycznych (*report definitions – new – force report – drag*).

Przed uruchomieniem symulacji, przeprowadzono standardową inicjalizację wartości początkowych analizowanego przepływu dla wartości domyślnych (*initialization*).

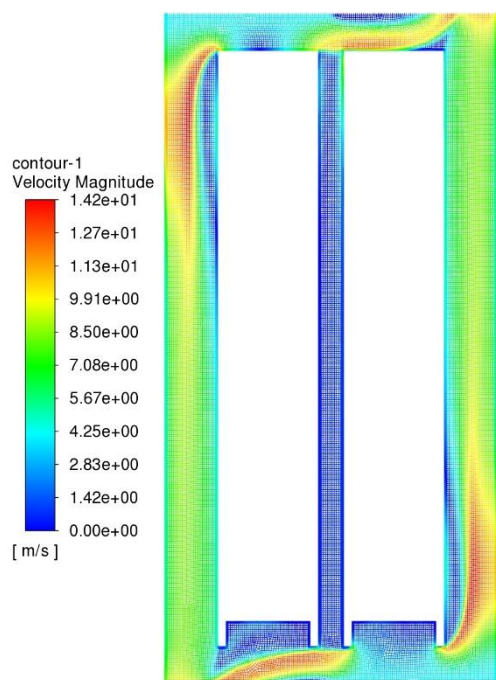
Symulacja została ustawiona na 1000 iteracji lub osiągnięcie dokładności kolejnych przybliżeń numerycznych na poziomie $1 \cdot 10^{-5}$.

Podczas symulacji analizowano zbieżność parametrów kolejnych obliczeń, która jest istotna dla poprawności symulacji.

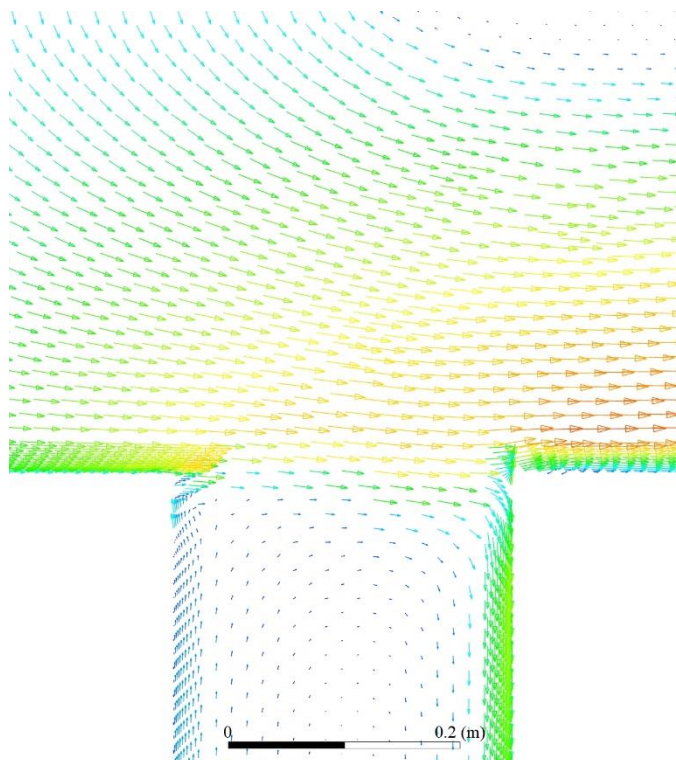
4.2. Wyniki symulacji numerycznej

W wyniku przeprowadzonych obliczeń numerycznych otrzymano:

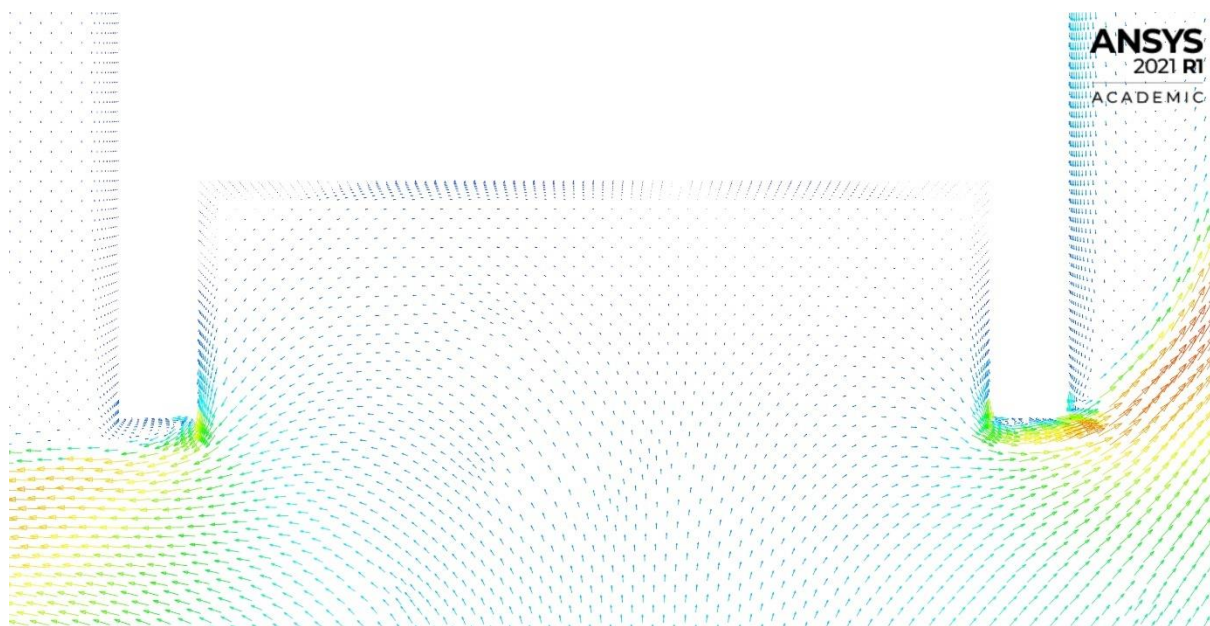
- grafiki prędkości powietrza opływającego naczynia wyciągowe (rys. 8 ÷ 10),
- grafiki gradientu ciśnienia powietrza opływającego naczynia wyciągowe (rys. 11 ÷ 13),
- grafiki gradientu lepkości turbulentnej powietrza opływającego naczynia wyciągowe (rys. 14 ÷ 16),
- wartości maksymalnych sił nacisku powietrza na klatki na kierunku równoległym i prostopadłym do jazdy naczyń.



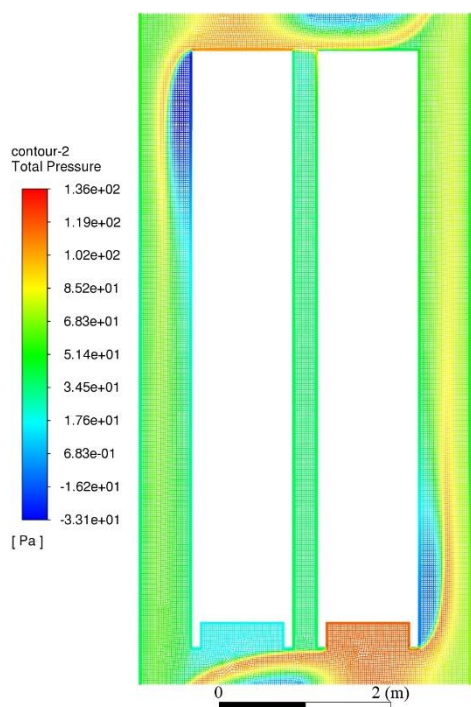
Rys. 8. Grafika wektorów prędkości powietrza opływającego naczynia wyciągowe



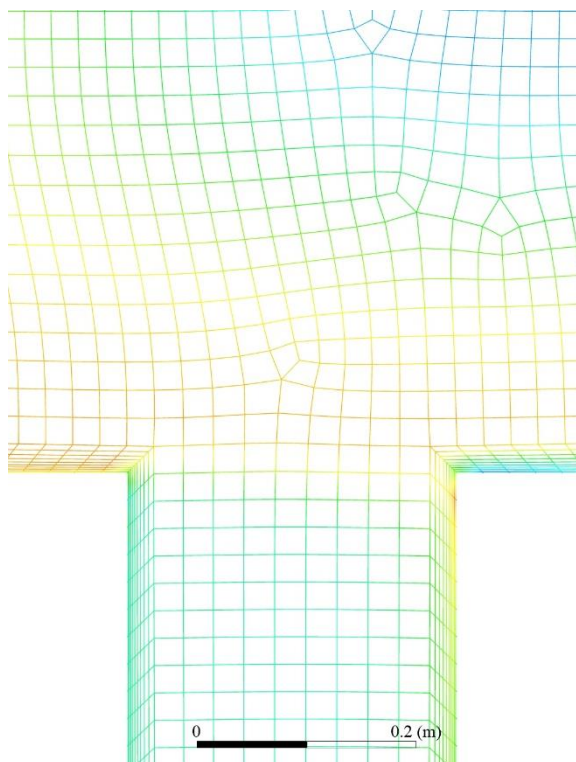
Rys. 9. Szczegół grafiki wektorów prędkości powietrza opływającego głowice naczyń wyciągowych



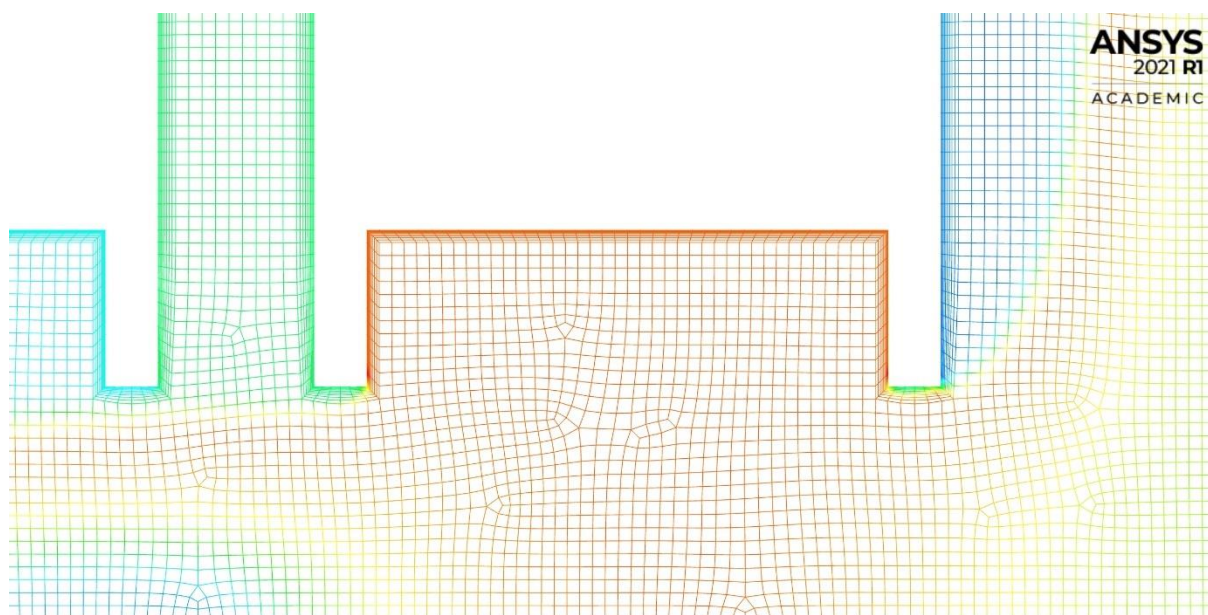
Rys. 10. Szczegół grafiki wektorów prędkości powietrza opływającego ramę dolną naczynia wyciągowego



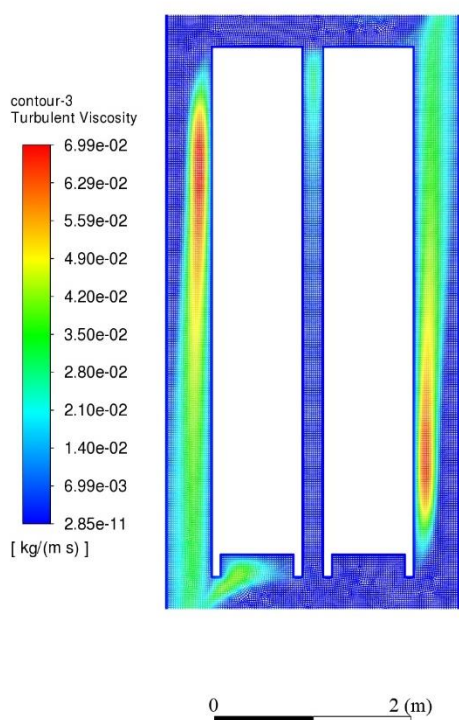
Rys. 11. Grafika gradientu ciśnienia powietrza opływającego naczynia wyciągowe



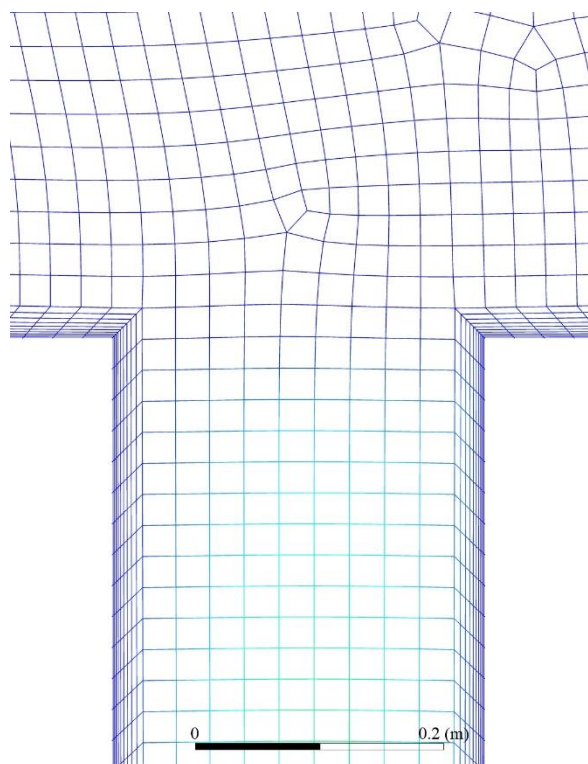
Rys. 12. Szczegół grafiki gradientu ciśnienia powietrza opływającego głowice naczyń wyciągowych



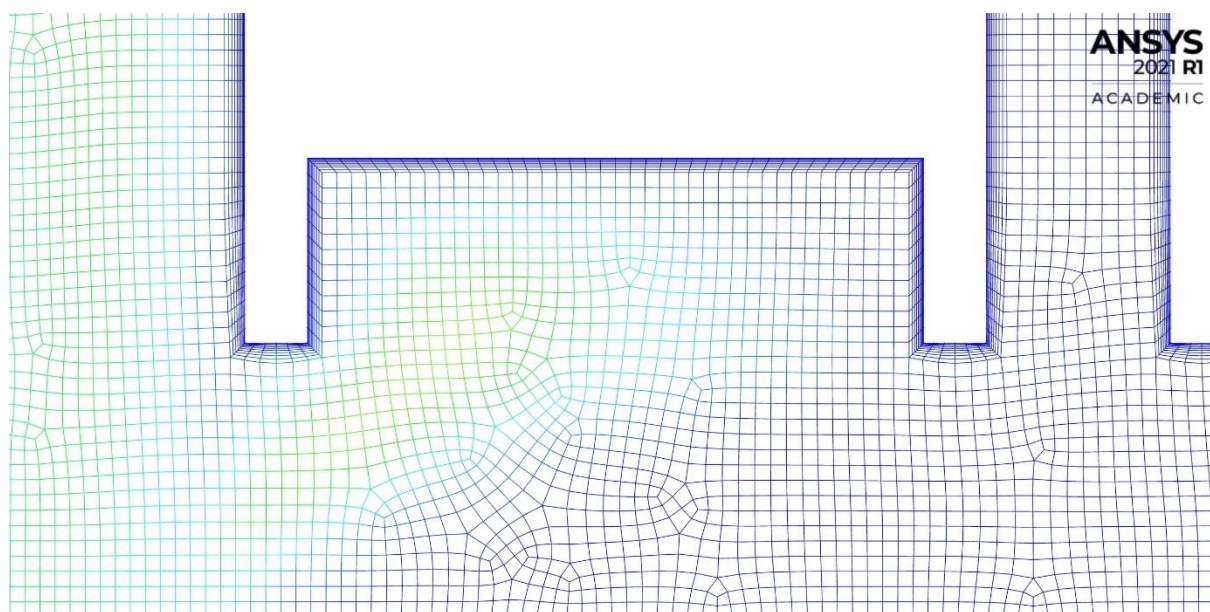
Rys. 13. Szczegół grafiki gradientu ciśnienia powietrza opływającego ramę dolną naczynia wyciągowego



Rys. 14. Grafika gradientu lepkości turbulentnej powietrza opływającego naczynia wyciągowe



Rys. 15. Szczegół grafiki gradientu lepkości turbulentnej powietrza opływającego główce naczyń wyciągowych



Rys. 16. Szczegół grafiki gradientu lepkości turbulentnej powietrza opływającego ramę dolną naczynia wyciągowego

W poniższej tabeli zestawiono otrzymane wyniki maksymalnych sił nacisku powietrza na klatki wielkogabarytowe na kierunku równoległym i prostopadłym do jazdy naczyń (tabela 1.).

Maksymalne siły nacisku powietrza na klatki wielkogabarytowe

Tabela 1.

Parametr	Oznaczenie	Wartość	Jednostka
Maksymalna siła nacisku powietrza na klatkę zachodnią na kierunku równoległym do jazdy	F_{Zy}	214,86	N
Maksymalna siła nacisku powietrza na klatkę zachodnią na kierunku prostopadłym do jazdy	F_{Zx}	82,67	N
Maksymalna siła nacisku powietrza na klatkę wschodnią na kierunku równoległym do jazdy	F_{Wy}	93,98	N
Maksymalna siła nacisku powietrza na klatkę wschodnią na kierunku prostopadłym do jazdy	F_{Wx}	98,21	N

4.3. Analiza wyników

W wyniku przeprowadzonych symulacji numerycznych CFD można wywnioskować, iż w sytuacji mijania się naczyń wyciągowych dochodzi do powstania burzliwych przepływów powietrza, które oddziałują na ruch naczyń.

Na rysunkach przedstawiających wektory prędkości powietrza opływające naczynia wyciągowe (rys. 8 ÷ 10), zauważyć można gromadzące się masy powietrza przy głowicy klatki zachodniej (poruszającej się do góry) i od spodu ramy dolnej (poruszającej się w dół) (rys. 8). Część tych obszarów powietrznych wypychana jest poza zarys naczyń (głównie w kierunku obudowy szybu), które nabierają prędkości do wartości rzędu 14,2 m/s. Wypychane powietrze nabiera charakteru turbulентnego, co przedstawiono na rysunkach 14 ÷ 16.

Ze względu na brak aerodynamicznych kształtów naczyń wyciągowych, powstają obszary podwyższonego ciśnienia na powierzchniach czołowych (wzrost ciśnienia o około 136 Pa) oraz obszary podciśnienia w sekcjach bocznych (spadek ciśnienia o około 33 Pa), co sugeruje powstanie przewidywanego efektu tłoka powietrznego (rys. 11, rys. 13).

Biorąc pod uwagę tendencje powietrza do dyfuzji, przez wzgląd na niewielką odległość klatek wielkogabarytowych w chwili ich mijania się, turbulентne przepływy spowodowane ruchem jednego naczynia oddziałują na drugie i odwrotnie. Sytuację tę przedstawia rysunek 9, w którym wektory prędkości przepływu powstałego w wyniku ruchu klatki zachodniej zwrócone są w kierunku klatki wschodniej. Znaczna część tych mas powietrza przepływa nad głowicą klatki wschodniej, jednak część przepływu kierowana jest między naczynia, gdzie dochodzi do gromadzenia się nadciśnieniowego powietrza w lewej sekcji bocznej klatki (rys. 12). Wpływające powietrze między naczynia ma charakter burzliwy (rys. 15).

Podobne zjawisko zachodzi w okolicach ramy dolnej klatki zachodniej, gdzie powietrze wypychane przez ruch naczynia wschodniego, kierowane jest w stronę drugiego. W efekcie dochodzi do powstania turbulencji, dodatkowo mieszających się przy obudowie szybu ze strumieniem przyspieszonego powietrza o podwyższonym ciśnieniu wypychanego przez klatkę zachodnią (rys. 16).

W wyniku ruchu obu naczyń wyciągowych dochodzi do powstawania sił oporowo-naciskowych stawianych przez powietrze (tab. 1). Na klatkę zachodnią oddziałuje siła pozioma o wartości 82,67 N, natomiast na klatkę wschodnią siła o wartości 98,21 N.



5. Podsumowanie

Wyniki otrzymane z przeprowadzonej symulacji numerycznej CFD sugerują, iż mijające się naczynia wyciągowe generują zawirowania powietrzne, które wpływają na zachowanie ich obu. W rozpatrywanym problemie, poruszające się w przeciwnych zwrotach z szybkością 4 m/s klatki wielkogabarytowe funkcjonujące w szybie „Kolejowy” ZKWK „Guido” wypychają tłoczone powietrze poza ich powierzchnie czołowe, wytwarzając turbulентne prądy powietrze. W konsekwencji, powietrze wytwarza siły nacisku na powierzchnie czołowe oraz, co istotne, sekcje boczne klatek. Siły te niewątpliwie wpływają na mimowolne ruchy boczne naczyń, które sumarycznie oddziałują na prowadniki zbrojenia szybowego.

Mimo, iż wartości tych sił nie przekraczają 100 N, należy mieć na uwadze, że naczynia te poruszają się stosunkowo wolno (4 m/s). Wraz ze wzrostem prędkości, siły oporowo- naciskowe będą rosły. W rezultacie, przypuszcza się, iż turbulентne prądy powietrzne mogą wpływać na zużycie prowadników. Mimo to, odnosząc otrzymane wyniki do rzeczywistych sił oddziałujących na zbrojenie szybowe, stanowią one nieznaczny ich odsetek. Warto jednakże zaznaczyć, iż burzliwe zawirowania powietrza mogą wpływać na bezpieczeństwo oraz komfort jazdy poprzez wprowadzanie naczyń w niepożądane ruchy boczne.

Przewiduje się, iż możliwa jest redukcja intensywności i wystąpień burzliwych pływów powietrznych przy zastosowaniu deflektorów aerodynamicznych na czołowych powierzchniach oporowych naczyń wyciągowych. Łagodniejsze ukierunkowanie powietrza wzdłuż sekcji bocznych (wywołane przez deflektory) powinno zminimalizować ruchy boczne naczyń wyciągowych, tym samym redukując siły nacisku na zbrojenie szybowe, dodatkowo poprawiając komfort i bezpieczeństwo jazdy. Będzie to przedmiotem kolejnych analiz, które zostaną przedstawione w serii artykułów.

Literatura

1. Starzycka A., Młynarczyk M., Zdanowski A.: Węgiel kamienny. Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa, 2020
2. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 25 kwietnia 2014 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu zakładów górniczych wydobywających kopaliny otworami wiertniczymi (Dz. U. 2014 poz. 812)
3. Kostrz J.: Głębinie szybów. Szkoła Eksploatacji Podziemnej, Kraków, 2014
4. Jeżowiecka-Kabsch K., Szewczyk H.: Mechanika Płynów. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2001
5. Szantyr J.: Wykład 11- Równanie Naviera-Stokesa, Politechnika Gdańska <http://www.pg.gda.pl/~krzyte/students/MPW11.pdf> (dostęp: 15.08.2021)
6. Jaszczur M.: Introduction to Ansys Solver Turbulence. Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, 2021
7. Nawart S., Napieraj S., Schmidt-Polończyk N.: Wentylacja wybranych obiektów podziemnych. Akademia Górniczo- Hutnicza, http://home.agh.edu.pl/~nawstan/wykwop1/Wyklad_7.pdf (dostęp: 15.08.2021)
8. Projekt techniczny nr 30999 pt.: „Klatka 3-piętrowa z łapadłami dla ZKWK „Guido” – szyb „Kolejowy” (materiały niepublikowane)
9. Siwek T.: Modelowanie maszyn wirnikowych w środowisku Ansys. Akademia Górniczo-Hutnicza [http://home.agh.edu.pl/~siwek/PompySprezarkiWentylatory_2017/Projekt/Projekt%20%20\(Turbo_CFD\)/Modelowanie%20went%20-](http://home.agh.edu.pl/~siwek/PompySprezarkiWentylatory_2017/Projekt/Projekt%20%20(Turbo_CFD)/Modelowanie%20went%20-)



%20prezentacja%201.pdf?fbclid=IwAR1dmw4AMRiWREUpcHtAiTgjTRpO5ix33akh_4ivgnBc0x1sh-O33XVq0-Y (dostęp: 15.08.2021)

10. Rak. J.: Modelowanie Matematyczne Instalacji Energetycznych. Politechnika Wroclawska
https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache%3ApsuWqIu1O2MJ%3Ahttps%3A%2F%2Fdata.e-science.pl%2F46759%2FModelowanie_Matematyczne.pdf%20&cd=14&hl=pl&ct=clnk&gl=pl&fbclid=IwAR0eC-wa4xx8ZX3wBhIZ2Q_6nOCVc7QPr_vBPYNdU9iTGdz4TDL02GwSvfM#77
(dostęp: 15.08.2021)