

CALCULATION OF SIMULATION OF EXPLOSION IN GRAIN SILOS

Summary

Example of simulation of explosion in grain silo is presented in the paper. The calculation was conducted by means of DESC program. The possibility of obtained results using to more accurate analysis of silo structure was pointed.

OBLICZENIA SYMULACYJNE WYBUCHÓW W SILOSACH ZBOŻOWYCH

Streszczenie

W artykule przedstawiono przykład symulacyjnych obliczeń wybuchów w silosie zbożowym prowadzonych za pomocą oprogramowania DESC. Wskazano na możliwości wykorzystania otrzymanych wyników do dalszej, dokładniejszej analizy właściwości konstrukcji silosów.

1. Wprowadzenie

Jednym z wielu czynników zagrażających zachowaniu bezpieczeństwa w przechowywaniu zbóż są pożary i wybuchy w silosach zbożowych i ich instalacjach. Znanie są wielkie wybuchy w silosach zbożowych, które spowodowały znaczne straty materialne i śmierć wielu ludzi. Do dramatycznej i najpoważniejszej w historii Niemiec eksplozji elewatora zbożowego doszło w grudniu 1970 roku nad kanałem łączącym Morze Północne z Bałtykiem. Sześć osób zginęło, a 17 zostało rannych. Straty materialne oszacowano na 10 milionów dolarów. Dziewięć osób zabitych, 30 rannych oraz straty materialne w wysokości 30 milionów dolarów to bilans wybuchu pyłu zbożowego w Corpus Christi (Teksas, Stany Zjednoczone, kwiecień 1981). W wyniku wybuchu pyłu w elewatorze zbożowym w miejscowości Blaye we Francji (20 sierpnia 1997 r.) śmierć poniosło 11 osób, a kompleks uległ całkowitemu zniszczeniu. W związku z tymi i podobnymi wypadkami podjęto starania w celu ustalenia zasad budowy i eksploatacji silosów zmniejszających niebezpieczeństwo wybuchów i minimalizujące ich skutki. W Unii Europejskiej opracowano wytyczne zawarte w aktach prawnych oraz normach, w tym w dyrektywach UE: Dyrektywie 94/9/WE (tzw. Dyrektywa ATEX95a) oraz 1999/94/WE (tzw. Dyrektywa ATEX137) [2]. Chociaż dyrektywy te same w sobie nie są wiążące, a zawierają jedynie wskazówki, to niektóre z nich są podstawą krajowych rozporządzeń właściwych organów państwowych. Zgodnie z nimi w przestrzeniach zagrożonych wybuchem pyłów obligatoryjnie powinny być stosowane odpowiednie procedury dotyczące działających tam urządzeń oraz systemów ochronnych.

2. Możliwości obliczeń symulacji wybuchów w silosach

Dotychczas prowadzono obliczenia symulacyjne silosów, dotyczące ich normalnej eksploatacji. Obliczenia takie umożliwiały uzyskanie wyników opisujących reakcje konstrukcji silosu na obciążenia od magazynowanego ziarna, wiatru, śniegu itp. Obliczenia sytuacji awaryjnych, w szczególności dotyczące wybuchów pyłów znajdujących się w silosie nie były powszechnie stosowane. Posługiwano się, co najwyżej, wynikami obliczeń przybliżonych, nie po-

zwalającymi jednak na uzyskanie danych o szczegółach zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych.

W szczególności trudne do oszacowania były wartości ciśnienia powstającego w silosie podczas wybuchu. Algorytmy zawarte w eurokodach, pozwalające obliczyć np. wielkość klap odciążających wybuch (ich zastosowanie jest jedną z najczęściej stosowanych metod zmniejszających niebezpieczeństwo związane ze skutkami wybuchu [3]) wykorzystują wartość wytrzymałości powłoki silosu. Wiadomo jednak, że wybuch jest zjawiskiem o bardzo dużej dynamice. Do w miarę dokładnego obliczenia rzeczywistej odporności ścian silosu na skutki wybuchu niezbędna jest znajomość wartości ciśnienia zmieniającego się w silosie podczas wybuchu.

Silnie obecnie rozwijaną dziedziną obliczeń komputerowych umożliwiających prowadzenie symulacji wielu zjawisk o dużej dynamice jest tzw. Komputerowa Dynamika Płynów (ang. CFD – *Computational Fluid Dynamics*). Jest to dział mechaniki płynów, w którym do rozwiązywania zagadnień przepływu płynów wykorzystuje się metody numeryczne.

Rozwijaniem oprogramowania realizującego tego typu obliczenia zajmuje się firma GexCON. Oferuje ona m.in. program FLACS z kodem DESC przeznaczony do przeprowadzenia symulacji przemysłowych wybuchów pyłów w obiektach o złożonych kształtach. Program ten:

- umożliwia realistyczne odwzajemienie budowy badanej instalacji przemysłowej,
- zawiera bazy danych materiałowych (z odpowiednimi parametrami opisującymi ich właściwości wybuchowe uzyskane ze standardowych testów przeprowadzonych w dwudziestolitrowych naczyniach badawczych) uwzględniające większość pyłów generowanych w przemyśle przetwórczym,
- uwzględnia zjawiska narastania ciśnienia i propagacji płomieni oraz zjawiska turbulencji,
- umożliwia symulację efektu zmiennego położenia miejsca wybuchu,
- uwzględnia zjawisko fali uderzeniowej,
- pozwala zasymulować zjawisko podnoszenie pyłów z zalegających osadów przez przepływające masy płynu i/lub fale uderzeniowe,
- identyfikuje najgorsze scenariusze wybuchu.

Poza tym, przy użyciu programu FLACS z kodem DESC, można zasymulować użycie środków zapobiegających lub łagodzących skutki wybuchów, w tym:

- urządzeń odciążających wybuch,
- szybko działających zaworów),
- systemów tłumiących wybuch.

Modelowanie turbulencji w FLACS-ie opiera się na modelu k-ε, umożliwiającym uniezależnienie zjawiska turbulencji od warunków początkowych oraz siatki elementów skończonych. Model spalania składa się z modelu płomienia i modelu prędkości spalania; model płomienia reprezentuje płomień wraz z jego lokalizacją i obszarem występowania. Model płomienia przenosi strefy reakcji z określonymi prędkościami spalania do stref z niespalonymi reagentami. Ta prędkość spalania opisana jest przez model prędkości spalania opisujący prędkość propagacji w zależności od takich parametrów jak reaktywność paliwa (wyrażoną przez laminarną prędkość spalania) czy parametry turbulencji; rozprzestrzenianie się produktów spalania (odbywające się w ramach praw termodynamiki) zależy od kompozycji – składu i właściwości – materiału, co kontrolowane jest przez odpowiedni model zjawisk chemicznych.

3. Przykład symulacji działania urządzeń zabezpieczających

Korzystając z programu DESC przeprowadzono symulacje wybuchu w stalowym silosie zbożowym o pojemności 100 ton, średnicy 5,4 m i wysokości 8,2 m, zbudowanym z blachy o grubości 1,5 mm. Badany silos był wyposażony w urządzenia zabezpieczające przed skutkami wybuchu, czyli w klapy umożliwiające ujęcie energii wybuchu na zewnątrz.

Symulowano wybuch pyłu zbożowego przebadanego w Laboratorium Pyłów Przemysłowych Zakładu Zwalczania Zagrożeń Pyłowych Głównego Instytutu Górnictwa. Oznaczono tam niezbędne do obliczeń parametry wybuchowości pyłu (zależność przyrostu ciśnienia podczas wybuchu badanego pyłu w zamkniętej objętości od jego koncentracji oraz zależność szybkości narastania ciśnienia podczas wybuchu badanego pyłu w zamkniętej objętości od koncentracji pyłu) wraz z dwoma podstawowymi parametrami określającymi skutki wybuchu pyłu, to jest maksymalnym ciśnieniem wybuchu p_{max} oraz maksymalnym wskaźnikiem wybuchowości K_{maxSt} (maksymalną szybkością narastania ciśnienia $(dp/dt)_{max}$).

p_{max} jest to maksymalne ciśnienie występujące w zamkniętym naczyniu podczas wybuchu atmosfery wybuchowej, oznaczone w określonych warunkach badania, to jest zgodnie z wytycznymi normy PN-EN 14034-1 "Oznaczenie charakterystyk wybuchowości obłoków pyłu. Część 1: oznaczenie maksymalnego ciśnienia wybuchu p_{max} obłoków pyłu".

K_{maxSt} jest to maksymalna wartość przyrostu ciśnienia wybuchu w jednostce czasu w trakcie wybuchów wszystkich atmosfer wybuchowych w zakresie wybuchowości substancji palnej w zamkniętym naczyniu, w określonych warunkach badania, zgodnie z PN-EN 14034-2 "Oznaczenie charakterystyk wybuchowości obłoków pyłu. Część 2: oznaczenie maksymalnej szybkości narastania ciśnienia

wybuchu $(dp/dt)_{max}$ obłoków pyłu". Maksymalna szybkość narastania ciśnienia wybuchu jest miarą gwałtowności wybuchu danego pyłu; jest to najważniejszy parametr określający skuteczność działania zabezpieczeń przeciwybuchowych, np. otworów odciążających; wartość $(dp/dt)_{max}$ wyznaczona dla danej objętości naczynia V zgodnie z normą, i wyznaczona wg zależności $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max} \cdot \sqrt[3]{V} = K_{st max}$ nazywa się wskaźnikiem wybuchowości $K_{st max}$.

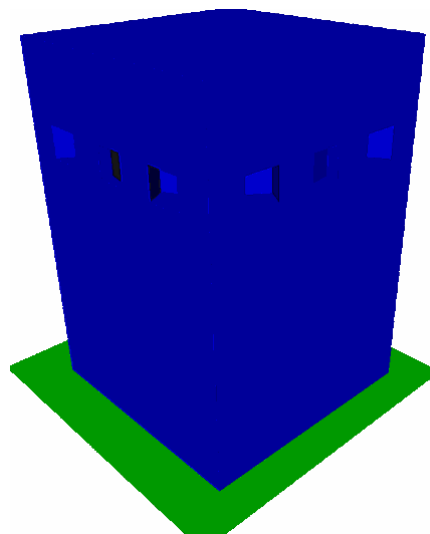
Przeprowadzono trzy symulacje. W dwóch przebadano wybuch w silosie bez ziarna, wypełnionym tylko rozpylonym pyłem zbożowym – różnica polegała na różnym rozmieszczeniu punktu zapłonu atmosfery wybuchowej; w trzeciej zasymulowano wybuch pyłu w silosie wypełnionym w 3/4 objętości ziarnem.

3.1. Model silosu

Jak wspomniano, symulowany wybuch dotyczył eksplozji pyłu zbożowego w silosie wyposażonym w klapy odciążające wybuch. Klapy te zostały dobrane zgodnie z normami: PN-EN 14797 ("Urządzenia odciążające wybuch") oraz PN-EN 14491 ("Systemy ochronne odciążające wybuchy pyłów").

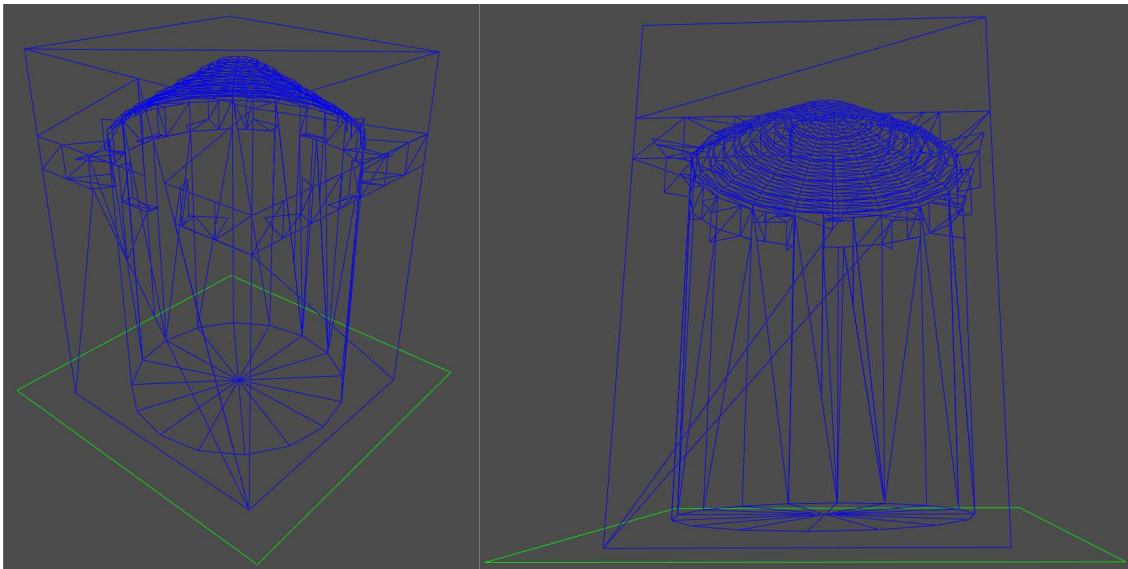
Na podstawie uzyskanych wyników obliczeń wiadomo było, że powierzchnia odciążenia nie powinna być mniejsza niż 5,87 m². Po zapoznaniu się z ofertami różnych producentów klapy odciążające oraz mając na uwadze konstrukcję silosu, wybrano klapy o nominalnej powierzchni odciążenia pojedynczej klapy równej 0,5 m² (wymiary klapy to 710x710 mm). Oznacza to, że na ostatniej cardze znajdować się będzie 12 klapy.

Geometria silosu zaimplementowana w programie obliczeniowym DESC, z uwagi na charakterystykę preprocesora tegoż kodu – o nazwie CASD, jak i sposób prowadzenia obliczeń w systemach typu CFD, została zamodelowana w sposób uproszczony. Nie ma to jednak istotnego znaczenia dla poprawności przeprowadzonych symulacji. Zamodelowaną geometrię silosu przedstawiono na rys. 1 i 2.



Rys. 1. Zewnętrzny kształt silosu w preprocesorze CASD programu DESC

Fig. 1. Outer shape of the silo in CASD preprocessor of DESC program

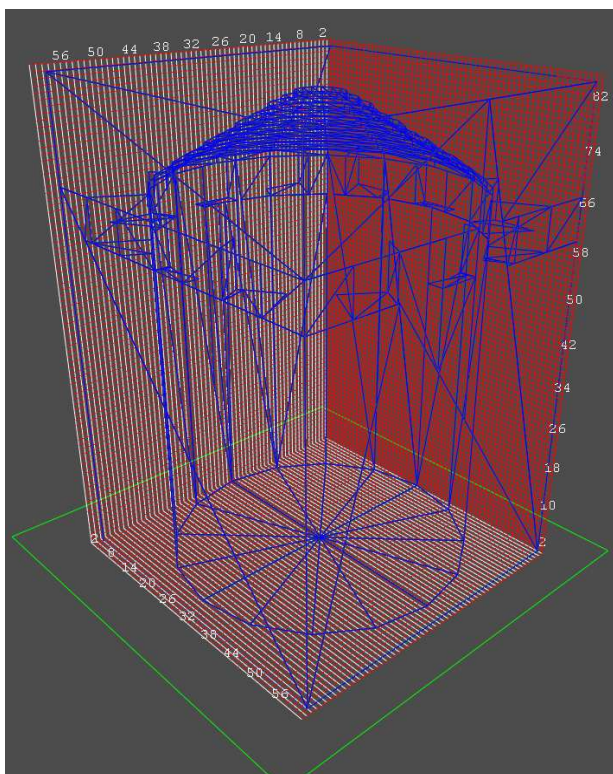


Rys. 2. Krawędzie geometrycznego modelu silosu
 Fig. 2. The edges of the silo geometric model

Poza definiowaniem kształtu silosu w preprocesorze CASD przygotowuje się wszystkie pozostałe dane wejściowe, które definiują daną symulację. Są to, poza geometrią obiektu:

- siatka obliczeniowa,
- tzw. porowatość obiektu,
- tzw. scenariusz symulacji.

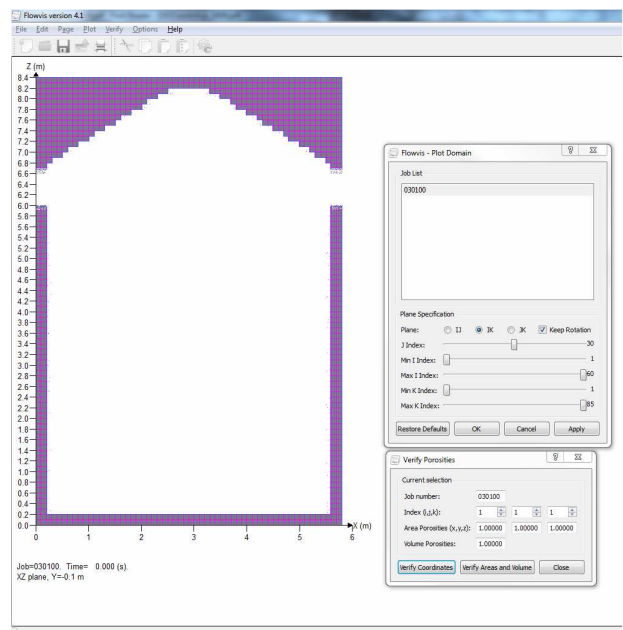
Po zaimplementowaniu geometrii obiektu, w preprocesorze definiuje się objętość obliczeniową (objętość, dla której przeprowadzane są obliczenia) oraz nakłada się na nią siatkę obliczeniową (rys. 3).



Rys. 3. Objętość obliczeniowa modelu podzielona na zbiór mniejszych objętości kontrolnych
 Fig. 3. Model simulation volume divided into control volumes

Objętość obliczeniowa (objętość prostopadłościanu o wymiarach 6 x 6 x 8,5 m) składa się z 306000 objętości kontrolnych. Zastosowana liczba objętości kontrolnych daje pewność uzyskania dokładnych wyników obliczeń (zastosowanie większej liczby objętości wiązałoby się z dodatkowym wydłużeniem czasu trwania symulacji, choć i przy tej liczbie objętości symulacja wybuchu dwusekundowego liczona była około 4 godzin).

Kolejnym krokiem jest zweryfikowanie "porowatości obiektu" w obszarze objętości obliczeniowej, czyli określenie, które objętości kontrolne są materiałem stałym (stanowią one przeszkodę dla wszelkiego przepływu, procesu spalania, eksplozji, itd.), a które są pustą przestrzenią. Proces weryfikacji porowatości modelu odbywa się automatycznie poprzez uruchomienie odpowiedniej funkcji w preprocesorze. Porowatość modelu w wybranym przekroju przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Porowatość modelu w przekroju przechodzącym przez oś silosu
 Fig. 4. Model porosity in section including silo axis

Ostatnim etapem definiowania symulacji wybuchu jest określenie tzw. scenariusza symulacji.

W pierwszej kolejności, w scenariuszu, definiuje się tzw. punkty monitorowane, tzn. punkty, w których rejestrowane będą, definiowane w dalszej kolejności, parametry wybuchu, takie jak:

- maksymalne ciśnienie wybuchu P_{MAX},
- ciśnienie wybuchu P,
- udział masowy produktu spalania PROD,
- prędkość turbulencji TURB,
- wektor prędkości VVEC (wraz z jego składowymi U, V, W).

Poza rejestrowaniem w wybranych punktach określonych parametrów, można zdefiniować parametry, które monitorowane będą w całym obszarze obliczeniowym, a nie tylko w wybranych punktach.

Kolejnymi parametrami definiowanymi w scenariuszu symulacji były parametry kontrolne symulacji (takie jak czas trwania symulacji (TMAX) i częstość zapisu wyników symulacji).

Następnie definiowane były warunki brzegowe i początkowe. Jeśli chodzi o warunki brzegowe, to rozumie się je jako warunki występujące poza granicami przestrzeni obliczeniowej. W przeprowadzonej symulacji przyjęto, że będą to warunki opisywane równaniami przepływu Eulera. Na obecnym, wstępnym etapie obliczeń nie przewidziano symulacji dla niestandardowych warunków brzegowych – np. dla warunków brzegowych opisywanych określonymi przez użytkownika rozkładami prędkości lub turbulencji poza obszarem roboczym (opcja WIND), czy też dla obszarów o stałej wartości ciśnienia na granicach objętości obliczeniowej (opcja PLANE_WAVE).

W przypadku warunków początkowych zdefiniowano:

- wartość grawitacji,
- kierunek przeciwny do wektora grawitacji,
- prędkość charakterystyczną,
- względną intensywność turbulencji,
- wartość skali turbulencji początkowej,
- początkową wartość ciśnienia wewnątrz przestrzeni obliczeniowej oraz poza obszarem obliczeniowym,
- wartość początkową temperatury,
- skład powietrza (atmosfery utleniającej).

Program DESC umożliwia wprowadzenie do modelu silosu klap odciążających wybuch. W czasie definiowania scenariusza wykorzystano tę funkcję. Zgodnie z wcześniej przedstawionymi obliczeniami i doбором urządzeń uwalniających wybuch, w obliczeniowym modelu zaimplementowano dwanaście klap o łącznej powierzchni odciążenia wynoszącej 6 m² (rys. 5).

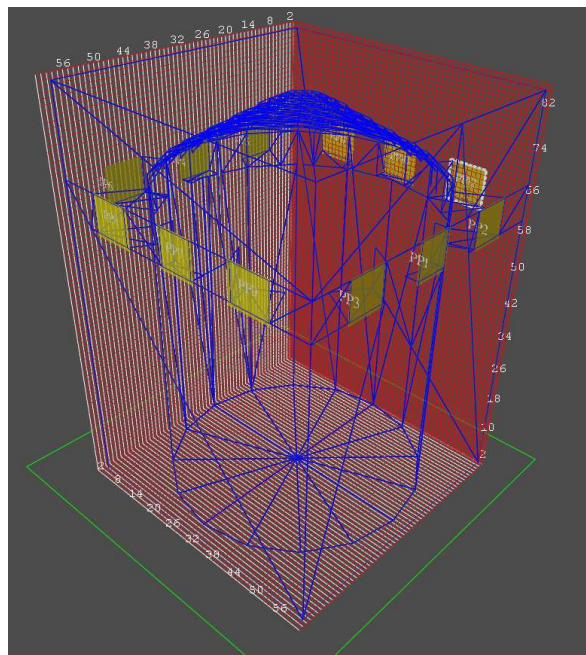
Następnym etapem definiowania parametrów symulacji jest określenie parametrów atmosfery wybuchowej pyłu, takich jak:

- parametry opisujące właściwości pyłu, w tym właściwości wybuchowe – do tego celu służy odpowiednio skonstruowany arkusz kalkulacyjny, który umożliwia generowanie odpowiedniego kodu z danymi, w postaci pliku tekstowego,
- położenie, kształt oraz wymiary bryły, w której znajduje się paliwo (do wyboru: kształt prostopadłościenny, romboidalny oraz elipsoidalny, w tym cylindryczny),
- koncentracja pyłu w atmosferze wybuchowej.

Dodatково system DESC umożliwia zdefiniowanie – podobnie jak w przypadku paliwa – położenia, kształtu i wymiarów bryły, tworzącej tzw. obszar obojętny, który,

choć może znajdować się wewnątrz obszaru obliczeniowego, nie bierze jednak udziału w wybuchu i do którego nie może przeniknąć paliwo. W ten sposób można zamodelować np. wypełnienie silosu ziarnem, co też uczyniono w przypadku drugiej symulacji.

Jako ostatnie zdefiniowano źródło zapłonu atmosfery wybuchowej pyłu – jego położenie, energię oraz czas zapłonu.



Rys. 5. Klapy odciążające wybuch zaimplementowane w modelu obliczeniowym

Fig. 5. Explosion panels in silo model

3.2. Wyniki obliczeń symulacyjnych

W rezultacie przeprowadzonych symulacji otrzymano wiele ważnych informacji o przebiegu wybuchu w silosie. Były to przede wszystkim dane o zmianach wartości ciśnienia w punktach kontrolnych. Na rys. 6 i 7 przedstawiono zmiany ciśnienia na ścianach silosu. Ciśnienie podano w bargach, tj. w barach powyżej ciśnienia atmosferycznego.

W szczególności pozwalają one stwierdzić, że monitorowane klapy odciążające zadziałały zgodnie z oczekiwaniami (rys. 7). Maksymalny wzrost ciśnienia na ścianach klap odciążających wyniósł 0,1 bara, zgodnie z zadanymi danymi wejściowymi, po czym nastąpił skokowy spadek do wartości ciśnienia atmosferycznego.

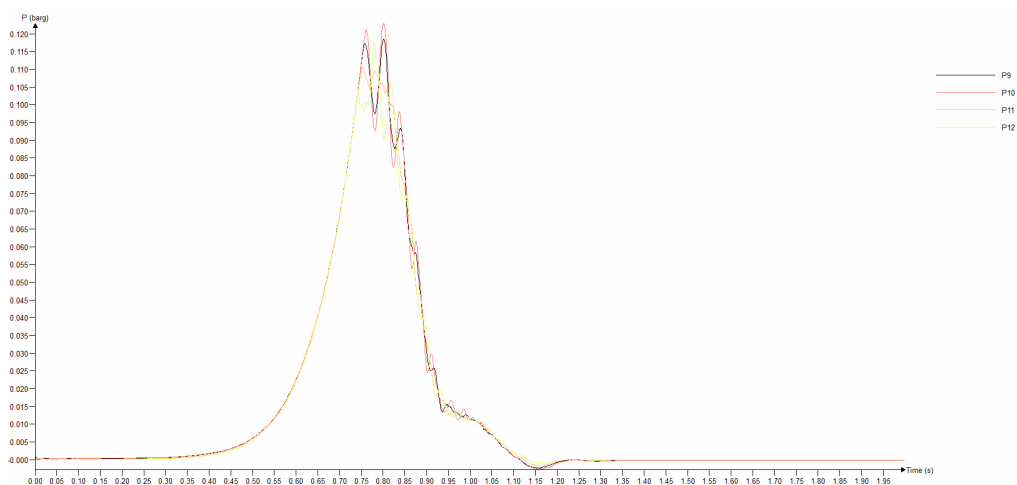
Na rys. 6 widać, że maksymalne ciśnienie na ścianach silosu wyniosło ok 0,12 barga oraz, że otwarcie klap odciążających spowodowało szybkie obniżenie ciśnienia w całym silosie.

Ważną informacją dotyczącą sytuacji w silosie podczas wybuchu jest także panująca tam temperatura. Ma to istotne znaczenie dla analizy bezpieczeństwa pożarowego. Na rys. 8 można zauważyć, że maksymalna temperatura przekroczyła 600°K i w czasie 2 sekund po wybuchu nie wykazywała tendencji malejących. Najszybciej temperatura wzrosła w punkcie inicjacji wybuchu.

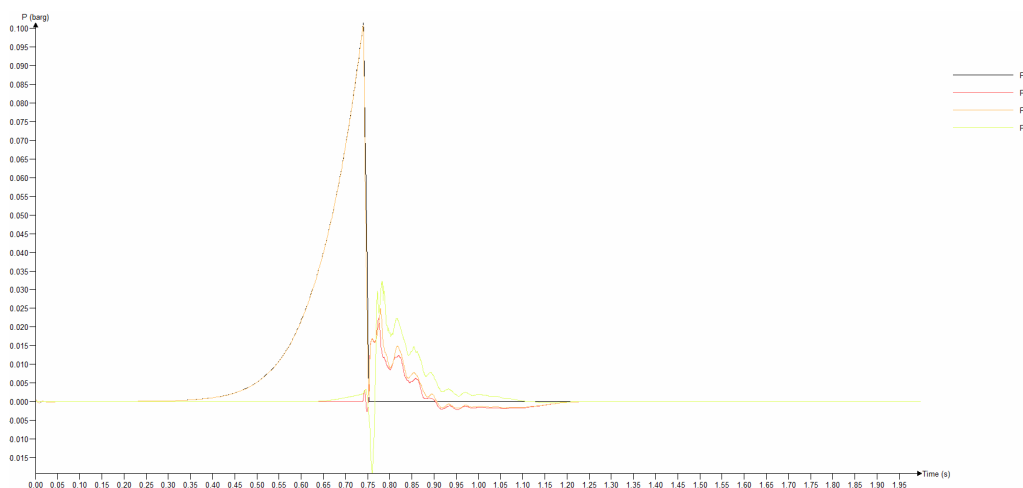
Rys. 9 przedstawia udział masowy produktów spalania, tzn. stosunek masy spalanych w danej chwili materiałów do masy całej atmosfery (mieszanki pyłowej) w silosie dla poszczególnych objętości obliczeniowych. Pozwala on zorientować się w zasięgu płomienia i jego intensywności w danej chwili wybuchu.

Analiza uzyskanych wyników pozwala stwierdzić, że klapy bezpieczeństwa spełniły swoje zadanie umożliwiając szybkie zmniejszenie ciśnienia w silosie. Nie wiadomo jednak, czy ściany silosu wytrzymają występujące podczas wybuchu chwilowe zwiększenie ciśnienia (czy nie nastąpi ich rozerwanie). Dlatego też przewidywane są dalsze obliczenia sprawdzające.

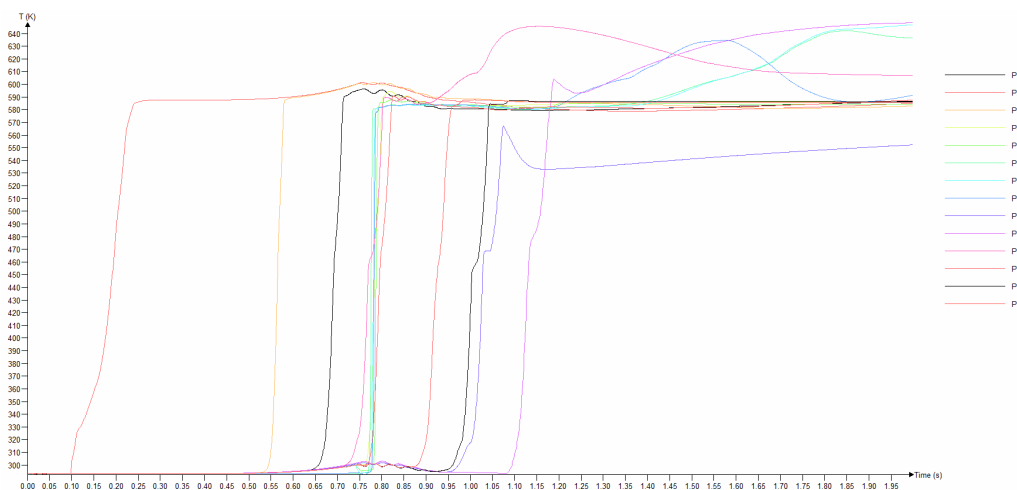
Uzyskane wyniki, a szczególnie wartości ciśnienia zmieniające się podczas wybuchu, zostaną przeniesione do modelu MES silosu w systemie Dytran i wykorzystane do symulacji zachowania się konstrukcji podczas i po wybuchu. Umożliwi to szczegółową analizę konstrukcji silosu i opracowanie rozwiązań zwiększających bezpieczeństwo.



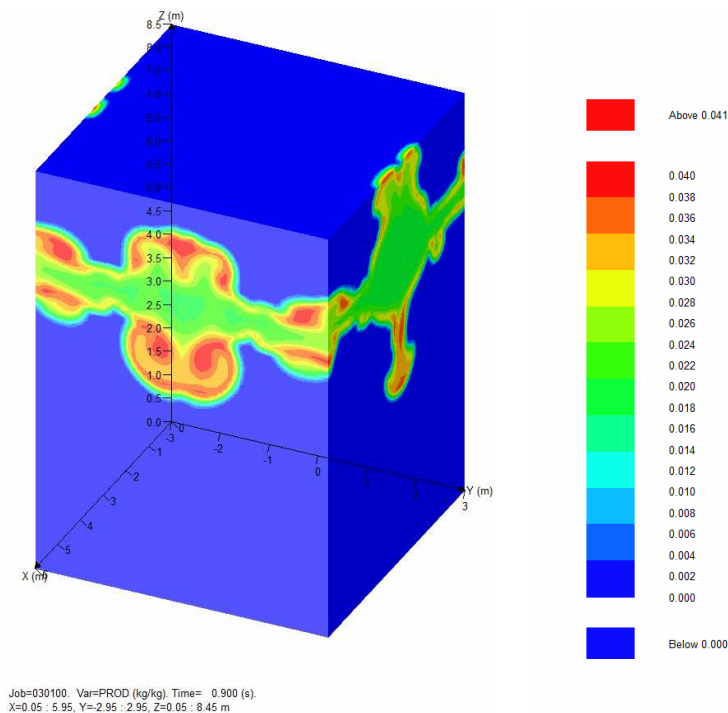
Rys. 6. Zmiany ciśnienia w punktach monitorowanych, leżących przy ścianach silosu na różnych wysokościach
 Fig. 6. Simulated pressure pulse in monitored points on silo wall on various height



Rys. 7. Zmiany ciśnienia w punktach monitorowanych, leżących w środku czterech wybranych klap odciążających
 Fig. 7. Simulated pressure pulse in monitored points on the center of four selected explosion panels



Rys. 8. Przebieg temperatury w poszczególnych punktach monitorowanych w czasie trwania symulacji
 Fig. 8. Simulated temperature pulse in monitored points



Rys. 9. Masowy udział produktów spalania dla 0,9 s symulacji
 Fig. 9. Mass fraction of combustion products in 0,9 s of simulation

4. Podsumowanie

Bezpieczeństwo pracy, w tym przede wszystkim bezpieczeństwo ludzi, jest coraz istotniejszym elementem oceny pracy maszyn i urządzeń rolniczych. Dotyczy to także bezpieczeństwa eksploatacji coraz popularniejszych na polskiej wsi silosów zbożowych. W artykule przedstawiono możliwości przeprowadzania obliczeń symulacyjnych wybuchu pyłu w silosie – najbardziej niebezpiecznego zjawiska związanego z ich użytkowaniem. Symulacje, których przykład przedstawiono w prezentowanym artykule, dostarczają szczegółowych informacji dotyczących przebiegu wybuchu. Umożliwiają także uwzględnienie kształtu silosu i działania urządzeń zabezpieczających, takich jak klapy odciażające. Otrzymane wyniki, dotyczące przede wszystkim wartości ciśnienia i temperatury podczas wybuchu, mogą być następnie wykorzystane do szczegółowych analiz

wytrzymałościowych konstrukcji silosu prowadzonych za pomocą systemów MES, takich jak Dytran. Dzięki temu możliwe będzie przeprowadzenie szczegółowej analizy konstrukcji silosu, a nawet przeprowadzenie obliczeń optymalizacyjnych.

5. Literatura

- [1] Dust - a Safety Risk. Why dust is an explosive subject. http://www.malux.fi/fi/uploads/Dust_flyer_Malux_eng.pdf
- [2] Zagrożenie wybuchem - kiedy i dlaczego. http://www.powderandbulk.pl/artykul_1068_2.html
- [3] Ochrona przeciwwybuchowa <http://www.corona.org.pl/fike/Ochrona%20PrzeciwWybuchowa.pdf>
- [4] Eckhoff R. K.: Dust explosions in the process industries. Gulf Professional Publishing, Elsevier Science, Amsterdam, 2003.
- [5] Burton J.: Dust explosion and protection: a practical guide. Institution of Chemical Engineers, Rugby, UK, 2002.

Artykuł powstał w związku z realizacją projektu rozwojowego N R10 0022 06 pt. „System transportu zboża w silosach o konstrukcji zmniejszającej ryzyko powstania zagrożenia wybuchem oraz minimalizującej niebezpieczeństwo dla ludzi w przypadku eksplozji” dofinansowanego przez NCBiR