

## SIMULATION TEST OF STRUCTURAL STABILITY OF A GRAIN SILO FOR THE PURPOSE OF CARRYING OUT THE SIMULATIONS OF GRAIN DUST EXPLOSION

### Summary

*This paper presents a description of the object (grain silo), for which the simulation of grain dust explosion was carried out, preceded by verification of compliance of the construction with the relevant European standards (eurocodes). As a check, a computational model was elaborated and finite element analysis computed in terms of durability and structural stability of the silo. Attention was also drawn to the occurrence of grain dust explosions in grain silos and to the technical measures for explosion protection - the main interest was focused on relief measures and the principle of their actions.*

## BADANIA SYMULACYJNE STATECZNOŚCI KONSTRUKCJI SIŁOSU ZBOŻOWEGO DLA POTRZEB PROWADZENIA SYMULACJI WYBUCHU PYŁU ZBOŻOWEGO

### Streszczenie

*W artykule przedstawiono opis obiektu (siłosu zbożowego), dla którego przeprowadzono symulację wybuchu pyłu zbożowego, poprzedzoną weryfikacją zgodności konstrukcji z odpowiednimi normami europejskimi (eurokodami). W ramach sprawdzenia opracowano model obliczeniowy i przeprowadzono analizę komputerową MES w aspekcie wytrzymałości i stateczności elementów konstrukcji siłosu. Zwrócono również uwagę na występujące w siłosach zbożowych niebezpieczeństwo wybuchów pyłów oraz na stosowane środki techniczne ochrony przeciwwybuchowej – główną uwagę skupiono na środkach odciążających wybuch i na zasadzie ich działania.*

### 1. Wprowadzenie

Zasiewy zbóż w Polsce obejmują ponad 70% całkowitej powierzchni zasiewów. Mają one nie tylko większościowy udział w produkcji rolnej, ale są również, a właściwie przede wszystkim, jej strategiczną częścią. Do lat 90. ubiegłego stulecia w dużych kompleksach magazynowych przeważały konstrukcje betonowe. Później dominować zaczęły siłosy metalowe, charakteryzujące się stosunkowo niskim kosztem inwestycji i łatwością eksploatacji. Upowszechniło się wówczas projektowanie siłosów oraz rozbudowa istniejących, wykonanych z konstrukcji stalowych, w układzie baterijnym (rys. 1). Początkowo zbiorniki metalowe miały ograniczoną pojemność. Obecnie pozwalają one na magazynowanie w pojedynczym siłosie surowców

w ilościach od kilku do kilkudziesięciu tysięcy ton [10].

Nikogo nie trzeba przekonywać jak ważnym zagadnieniem w przemyśle rolnym i spożywczym jest bezpieczeństwo pracy – począwszy od najważniejszego, czyli bezpieczeństwa i ochrony zdrowia pracowników, przez bezpieczeństwo samego procesu przetwórczego, a skończywszy na bezpieczeństwie środków trwałych, maszyn itp. Jednym z wielu czynników zagrażających zachowaniu bezpieczeństwa pracy są pożary i wybuchy, a wśród nich pożary i wybuchy pyłów występujące w przechowywaniu zbóż – w siłosach zbożowych i ich instalacjach.

Choć wybuchy pyłów, w tym pyłów zbożowych, nie są najczęściej występującymi wypadkami w pracy, to jednak stanowią one bardzo duże zagrożenie dla otoczenia (rys. 2).



Rys. 1. Bateria siłosów metalowych przeznaczonych do magazynowania zbóż  
Fig. 1. Battery of metal silos for grain storage



Rys. 2. Zniszczenia spowodowane wybuchem pyłu w zespole silosów w Blaye (Francja)  
 Fig. 2. The destruction caused by the explosion of grain dust in silos in Blaye (France)

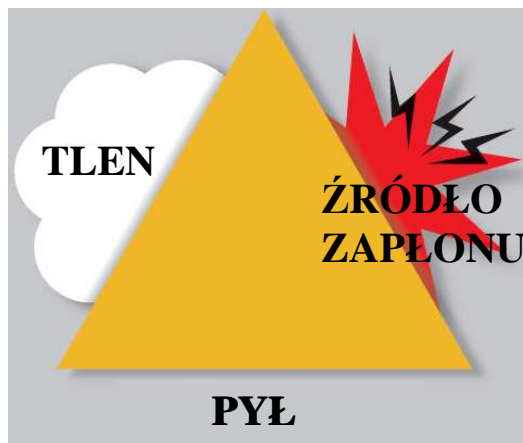
Innym źródłem są wybuchy chmur par oraz wybuchy rozszerzających się par wrzących płynów, powodujące zagrożenie wybuchowe w przemyśle przetwórczym [1, 2, 3]. Wypadki te, nierzadko śmiertelne, prowadzą nie tylko do istotnych strat ekonomicznych i dramatycznych sytuacji w rodzinach ofiar dotkniętych skutkami wybuchów, ale również do zachwiania równowagi w środowisku naturalnym. Tylko sama eksplozja kompleksu elewatorowego w Roland-Mühle w Bremie (Niemcy) z 1979 roku pochłonęła aż 14 ofiar śmiertelnych i doprowadziła do strat materialnych o wartości 50 milionów euro. Na terenie Unii Europejskiej dochodzi rocznie do około 2000 eksplozji pyłów, przy czym analiza niemal 600 wypadków w Niemczech wykazała, że 1/4 spośród wszystkich wybuchów pyłów stanowiły eksplozje pyłów w przemyśle spożywczo-rolniczym i paszowym, przy czym najbardziej narażone na eksplozje są silosy, systemy odpylające i wentylacyjne (w tym suszarnie i magazyny przeznaczone do suszenia zbóż) [12].

## 2. Wybuch pyłu palnego

W literaturze najczęściej można się spotkać z dwiema kategoriami definicji wybuchu. W pierwszej kategorii definicji mowa jest o uderzeniu i hałasie spowodowanym gwałtownym uwolnieniem potężnej fali ciśnienia lub fali uderzeniowej. Źródło fali ciśnienia – pochodzenia chemicznego czy mechanicznego – w tym wypadku ma drugorzędne znaczenie i jako takie nie jest brane pod uwagę. Definicja ta jest zgodna z podstawowym znaczeniem słowa eksplozja. W drugiej kategorii natomiast wybuch definiowany jest w odniesieniu do gwałtownego uwolnienia energii chemicznej. Zatem jedna z definicji skupia się na przyczynie, druga zaś na skutku [1, 2].

Aby w ogóle doszło do eksplozji atmosfery wybuchowej pyłu, muszą zostać spełnione trzy zasadnicze warunki (rys. 3):

- musi być obecna chmura materiału palnego (pyłu) o cząstkach mniejszych niż 0,5 mm; stężenie chmury pyłu musi się mieścić w przedziale pomiędzy dolną a górną granicą wybuchowości danego materiału sypkiego,
- musi być odpowiednio duża ilość środka utleniającego, czyli tlenu,
- musi wystąpić właściwe źródło zapłonu – na przykład iskra elektryczna powstała podczas wyjmowania wtyczki z gniazda lub dostatecznie gorąca powierzchnia [1, 2].



Rys. 3. Warunki konieczne do zajścia eksplozji pyłów  
 Fig. 3. Necessary conditions for the occurrence of dust explosions

## 3. Środki techniczne ochrony przeciwwybuchowej

Eksplozji pyłów zawsze towarzyszy rozprzestrzenianie się płomieni i działanie ciśnienia. W przypadku deflagracji postępującej w zamkniętej objętości, takiej jak wnętrze silosu, przy braku środków ochronnych ciśnienie wzrasta w ciągu kilku milisekund do maksymalnego ciśnienia wybuchu, które wynosi zazwyczaj od 8 do 10 barów nadciśnienia. Silosy, zbiorniki magazynowe, filtry i inne urządzenia przemysłowe tego typu występujące w instalacjach magazynowania zboża, produktów rolnych, spożywczych nie są z reguły projektowane na takie ciśnienia. Dlatego konieczne staje się podjęcie odpowiednich środków ochronnych, przy czym w wypadku doboru i projektowania tych środków należy postępować stopniowo: najpierw dokładnie określić niebezpieczeństwo, jego rodzaj i parametry charakteryzujące substancję wybuchową, rodzaj instalacji itp., a dopiero potem wybrać i wprowadzić – po przeprowadzeniu wnikliwej i szczegółowej analizy – odpowiednie środki chroniące przed wybuchem, które można podzielić na trzy zasadnicze grupy:

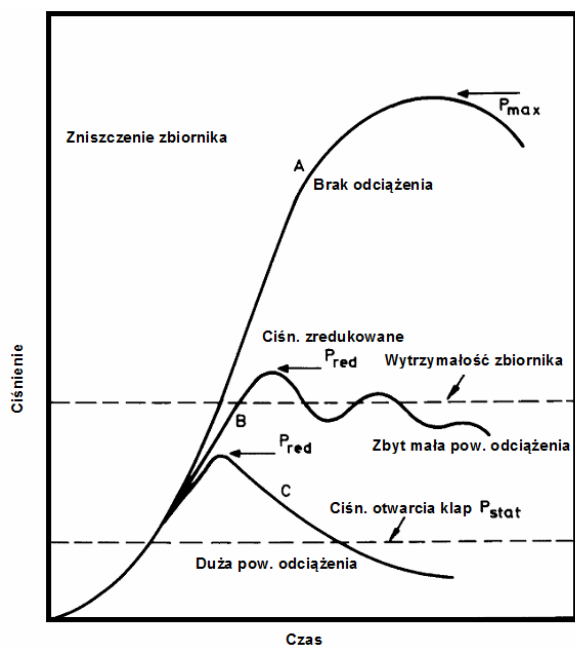
- środki zapobiegające tworzeniu się atmosfer wybuchowych,
- środki eliminujące zapłon niebezpiecznych atmosfer wybuchowych,
- środki minimalizujące do akceptowalnych rozmiarów skutki eksplozji (akceptowalne – zapewniające zdrowie i bezpieczeństwo pracowników) [11].

Spośród wymienionych środków uwolnienie ciśnienia wybuchu jest najpowszechniej stosowanym i najlepiej rozumianym działaniem dla opanowania następstw wybuchu pyłu (rys. 4). Zasada działania tego środka ochronnego polega na zapobieżeniu wytworzeniu się niedopuszczalnie wysokiego ciśnienia wewnątrz zbiornika (silosu) poprzez otwarcie we właściwym czasie określonego otworu odciażającego o odpowiednio dobranej – na podstawie określonych obliczeń – powierzchni uwolnienia, dzięki czemu ciśnienie wybuchu nie przekracza wytrzymałości zbiornika (rys. 5). Do tego celu można zastosować płytki bezpieczeństwa (kłapy bezpieczeństwa), które chronią urządzenia również przed niedopuszczalnie wysokim nadciśnieniem mogącym wystąpić z powodu mechanicznej niesprawności układu i, zależnie od zastosowania, ewentualnie nawet przed niedopuszczalnym obciążeniem przez podciśnienie.



Rys. 4. Uwolnienie wybuchu za pomocą klap bezpieczeństwa (badania) oraz klap bezpieczeństwa zainstalowane na rzeczywistym silosie

Fig. 4. Explosion relief panels as a mitigation measure of grain dust explosions effects – validation and real panels mounted on an industrial silo



Rys. 5. Przebieg ciśnienia eksplozji z uwolnieniem i bez uwolnienia ciśnienia wybuchu

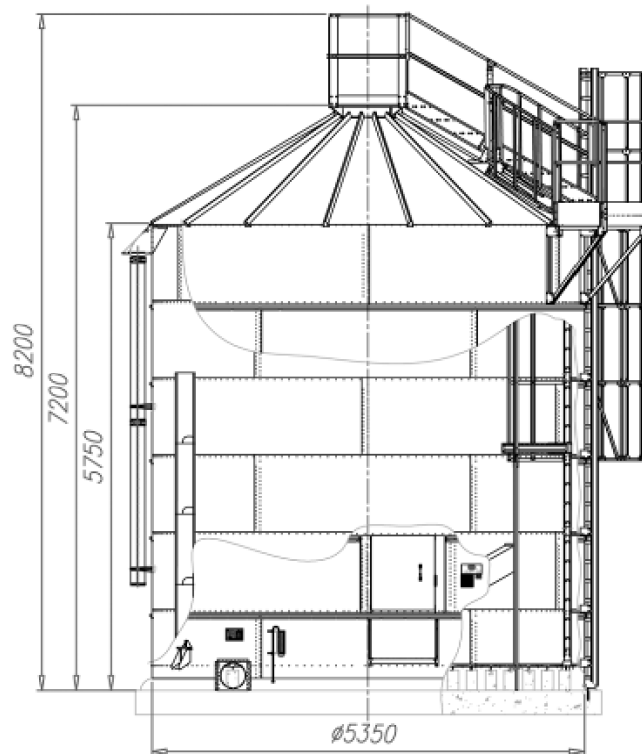
Fig. 5. Influence of usage of relief panels on the explosion pressure

Przeciwywybuchowe klap odciążające mają małą masę w stosunku do uwalnianej objętości – rzędu dziesiątych części  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ , dlatego też działają prawie bez żadnej zwłoki; mogą być montowane w różnych położeniach i zapewniają pyłoszczelne zamknięcie. W razie wybuchu klap bezpieczeństwa otwierają się bez tworzenia odłamków.

Zgodnie z PN-EN 14797 elementy odciążające powinny być zaprojektowane tak, aby w wyniku ich zniszczenia nie dochodziło do rozrzutu fragmentów. Wymagania te mogą być potwierdzone badaniami za pomocą wybuchów; można jednak stosować inne metody, np. obliczeniowe, jeżeli ich wiarygodność została sprawdzona przez reprezentatywne badania za pomocą wybuchu. Urządzenia odciążające wybuch powinny być tak skonstruowane, aby ich otwarcie następowało pod działaniem ciśnienia przekraczającego ich statyczne ciśnienie otwarcia. Podczas otwarcia następuje zwolnienie określonej powierzchni, której wielkość musi być taka, aby ciśnienie resztkowe w zbiorniku nie przekraczało w żadnym wypadku ciśnienia dopuszczalnego (obliczeniowej wytrzymałości zbiornika/obudowy) [3, 6, 8].

#### 4. Opis silosu poddanego obliczeniom inżynierskim

Silos winien spełniać nie tylko wymagania norm europejskich w aspekcie wytrzymałości i stateczności konstrukcji poddanej standardowemu oddziaływaniu wynikającemu z pełnionej podstawowej funkcji, tj. magazynowania zboża. Istotne jest, aby na etapie projektowania przewidzieć również oddziaływanie warunków niestandardowych, np. oddziaływanie ciśnienia generowanego w czasie wybuchu pyłu zbożowego, czy to w samym silosie, czy też w instalacji transportującej zboże. Jednak nim przystąpi się do rozpatrywania "niecodziennych" obciążeń, jakimi może zostać poddana konstrukcja silosu, należy przeprowadzić podstawowe obliczenia wytrzymałościowe i statecznościowe. Podlegająca obliczeniom wytrzymałościowym i statecznościowym (poprzedzającym symulacje wybuchu pyłu zbożowego) konstrukcja silosu, którego uproszczony schemat przedstawiono na rys. 6, posiadała następującą charakterystykę:



Rys. 6. Schemat konstrukcji silosu stalowego płaskodennego poddanego obliczeniom MES

Fig. 6. Scheme of a flat-bottomed steel silo subjected to FEM calculations



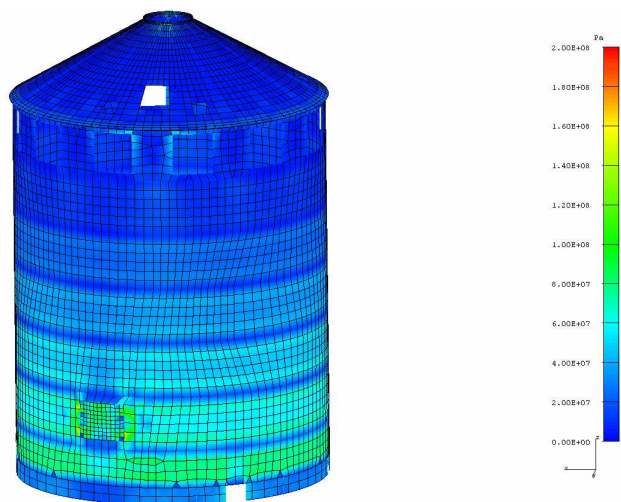
- całkowita wysokość silosu  $H = 8200$  mm,
- wysokość części walcowej  $h = 5750$  mm,
- liczba carg  $i = 6$ ,
- wysokość dachu  $H_2 = 1250$  mm,
- wysokość podpór  $H_4 = 3024$  mm,
- liczba podpór  $lp = 12$ ,
- średnica silosu  $D = 5350$  mm,
- pojemność użytkowa  $V = 130$  m<sup>3</sup>,
- ładowność  $Q = 100$  t (przy założeniu gęstości składowanego materiału na poziomie 750 kg/m<sup>3</sup>),
- ciężar pustego silosu  $Q_s = 2200$  kg.

## 5. Analiza MES

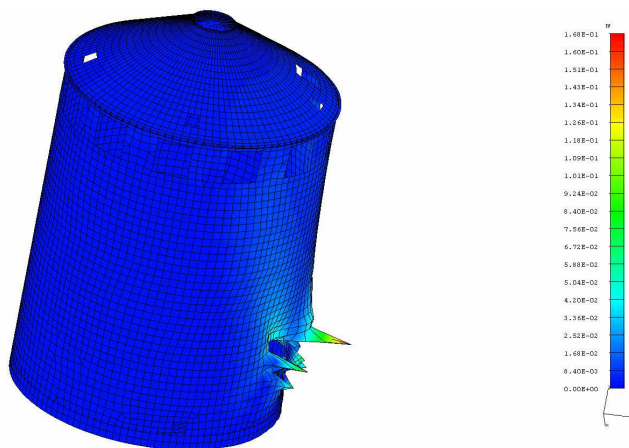
W czasie analizy konstrukcji silosu opracowano kompletny model obliczeniowy MES silosu z klapami odciążającymi. Model geometryczny silosu różnił się od przedstawionego na rys. 6. Poszczególne modele silosu różniły się między sobą stopniem skomplikowania oraz ilością carg. W celu zachowania ładowności silosu z klapami na poziomie 100 t, konstrukcja tego obiektu wymagała zastosowania dodatkowej cargi (w porównaniu do silosu bez klap), na której montowane będą klapki.

Obliczenia wytrzymałościowe obejmowały analizę naprężeń statycznych oraz przemieszczeń dla założonych przypadków obciążeń oraz analizę stateczności wybojczy konstrukcji. Na podstawie analizy konstrukcji wybrano reprezentatywne warunki obciążeń, którym konstrukcja może zostać poddana podczas eksploatacji. Wartości poszczególnych obciążeń wyznaczono na podstawie odpowiednich, obowiązujących norm europejskich (tzw. eurokodów). W celu usprawnienia procesu wyznaczania obciążeń opracowano odpowiednie procedury obliczeniowe w środowisku Matlab.

Z uwagi na obszerność zagadnienia, oraz ograniczoną objętość tekstu, w niniejszej pracy nie zamieszczono szczegółowego opisu modeli obliczeniowych oraz wyników obliczeń. Przedstawiono jedynie wybrane rezultaty symulacji – rys. 7 i 8, tab. 1.



Rys. 7. Wyniki obliczeń MES silosu z klapami dla wybranego przypadku obciążeń  
Fig. 7. The results of FEM calculations of a silo with relief panels for the selected load case



Rys. 8. VII postać wybojczy silosu z klapami dla wybranego przypadku obciążeń  
Fig. 8. The seventh buckling form of a silo with relief panels for the selected load case

Tab. 1. Postaci wybojczy silosu z klapami oraz odpowiadające im współczynniki wybojczy  
Table 1. Forms of buckling of a silo with explosion relief panels and their corresponding buckling coefficients

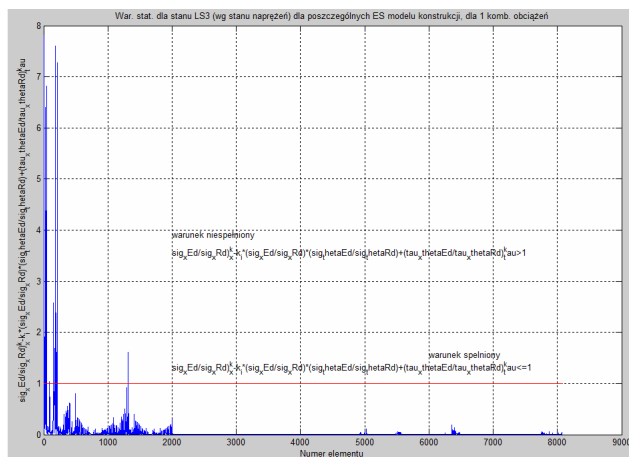
Postać wybojczy	Współczynnik wybojczy
I	2,37
II	2,54
III	2,68
IV	2,77
V	2,98
VI	2,99
VII	3,00
VIII	3,10
IX	3,30

Na rys. 7 i 8 przedstawiono graficzną reprezentację wybranych wyników obliczeń z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Na rys. 7 ukazano rozkład naprężeń w konstrukcji silosu poddanej oddziaływaniu w postaci: ciężaru własnego konstrukcji, maksymalnego tarcia powierzchniowego, parcia poziomego od ziarna oraz śniegu. Z kolei na rys. 8 – dla takiego samego przypadku obciążenia, pokazano VII postać wybojczy – utratę stateczności konstrukcji w tym wypadku następuje w rejonie dolnego wjazdu inspekcyjnego. Natomiast w tab. 1 przedstawiono zbiorcze wyniki obliczeń współczynników wybojczy dla poszczególnych (pierwszych dziesięciu) postaci wybojczy – tak jak i poprzednio, tak i w tym wypadku wyniki odnoszą się do opisanego w tym akapicie przypadku obciążeń.

W celu usprawnienia procesu weryfikacji stateczności obiektu, opracowano i uruchomiono, odpowiednie procedury, zgodnie z wytycznymi eurokodów. Stworzone w Matlabie procedury pozwoliły przeprowadzić weryfikację stanów granicznych (maksymalnych dopuszczalnych obciążeń) konstrukcji silosu.

Na rys. 9 przedstawiono graficzną prezentację wybranych wyników obliczeń przeprowadzonych z wykorzystaniem wspomnianych procedur. Wyniki przedstawiono w postaci wykresu obrazującego zachowanie warunku stateczności (aby warunek był spełniony, wartości dla poszczególnych argumentów muszą być mniejsze lub równe 1) dla stanu granicznego LS3 (wykres odnosi się do przypadku obciążenia opisanego we wcześniejszym akapicie).

cie) w zależności od poszczególnych elementów skończonych zdyskretyzowanej konstrukcji. Na podstawie wykresu można stwierdzić, że warunek nie jest zachowany w elementach skończonych odpowiadających włazowi dolnemu i elementach z nim graniczącymi.



Rys. 9. Wyniki obliczeń stateczności dla stanu LS3 dla poszczególnych elementów skończonych modelu konstrukcji silosu z klapami odciążającymi

Fig. 9. Results of structural stability calculations for the LS3 state for particular finite element of the model of the silo with relief panels

## 6. Podsumowanie

Zagadnienia wybuchu pyłów zbożowych w silosach magazynujących nie należy bagatelizować, czego potwierdzeniem są nierzadko występujące eksplozje atmosfer wybuchowych pyłów. Taki stan rzeczy wymusza na projektantach i producentach silosów podjęcia odpowiednich środków zaradczych, i uwzględniania ich już na etapie projektowania. To z kolei wymusza konieczność posiadania odpowiedniej wiedzy, znajomości stosownych norm i wytycznych,

Artykuł powstał w wyniku realizacji projektu rozwojowego nr N R10 0022 06/2009, pt.: „Systemy transportu zboża w silosach o konstrukcji zmniejszającej ryzyko powstania zagrożenia wybuchem oraz minimalizującej niebezpieczeństwo dla ludzi w przypadku eksplozji”.

a w ostateczności opracowania odpowiednich procedur usprawniających proces projektowania i weryfikacji przyjętych rozwiązań. Te problemy częściowo mogą być wyeliminowane metodami i narzędziami wspomagającymi proces projektowania i symulacji komputerowej.

## 7. Literatura

- [1] Abbasi T., Abbasi S. A.: Dust explosions – cases, causes, consequences, and control. Review. Journal of Hazardous Materials, 2007, 140, s. 7-44.
- [2] Eckhoff R. K.: Dust explosions in the process industries. Gulf Professional Publishing, Elsevier Science, Amsterdam, 2003.
- [3] Burton J.: Dust explosion and protection: a practical guide. Institution of Chemical Engineers, Rugby, UK, 2002.
- [4] Szczepaniak J.: Symulacja zachowań dynamicznych maszyn rolniczych z uwzględnieniem kryterium stateczności dla potrzeb bezpieczeństwa ruchu. Rozprawy habilitacyjne Nr 28, Inżynieria Rolnicza, 2008, nr 8(106), s. 129.
- [5] Szczepaniak J., Pawłowski T.: Rola technik komputerowych w projektowaniu i badaniach maszyn rolniczych w PIMR. Boszkowo, Materiały z XXX Jubileuszowej Letniej Szkoły Inżynierii Systemów Rolnictwa, 2008.
- [6] PN-EN 14797 "Urządzenia odciążające wybuch", PKN.
- [7] PN-EN 14491 "Systemy ochronne odciążające wybuchy pyłów", PKN.
- [8] Materiały informacyjne, prospekty, katalogi firmy Fike ([www.fike.com](http://www.fike.com))
- [9] Materiały informacyjne, prospekty, katalogi firmy Malux ([www.malux.com](http://www.malux.com))
- [10] Bochat P., Kupczyk A.: Przechowywanie ziarna – rodzaje, wady i zalety magazynów zbożowych. Przegląd Zbożowo-Młynarski, 2/2009, s. 16-18.
- [11] Grzechowiak R., Bitner W., Szczepaniak J. i in.: System transportu zboża w silosach o konstrukcji zmniejszającej ryzyko powstania zagrożenia wybuchem oraz minimalizującej niebezpieczeństwo dla ludzi w przypadku eksplozji (zadanie 1 i 2), Prace PIMR, 2009, 33/2009/DC/PR.
- [12] Dust – a Safety Risk. Why dust is an explosive subject. [http://www.malux.fi/fi/uploads/Dust\\_flyer\\_Malux\\_eng.pdf](http://www.malux.fi/fi/uploads/Dust_flyer_Malux_eng.pdf)