Leszek Flis[1]

SYMULACJA WYTĘŻENIA ZBIORNIKA SPECJALNEGO DO PRZEWOZU ŁADUNKÓW NIEBEZPIECZNYCH ŚRODKAMI TRANSPORTU W POLSCE

Wstęp

Zalecenia dotyczące transportu towarów niebezpiecznych opracowane przez ONZ dla różnych środków transportu – drogowego, kolejowego, morskiego i lotniczego – są podstawą do opracowania szczegółowych zasad bezpieczeństwa przewozu tych materiałów w transporcie drogowym w Europie. Komitet Ekspertów Europejskiej Komisji Gospodarczej ONZ (United Nations Economic Commission for Europe) opracował i opublikował w Genewie w dniu 30 września 1957 r. Umowę europejską o przewozie drogowym towarów niebezpiecznych (The European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road - ADR), której Polska jest sygnatariuszem.

Umowa ADR składa się z umowy właściwej oraz z załączników A i B, będących jej integralną częścią. Umowa właściwa określa stosunki prawne między uczestniczącymi państwami, natomiast załączniki zawierają przepisy regulujące w szerokim zakresie warunki przewozu poszczególnych materiałów niebezpiecznych w międzynarodowym transporcie samochodowym [6]. Załącznik A obejmuje podział wszystkich produkowanych na świecie materiałów niebezpiecznych na 13 klas zagrożeń oraz zawiera szczegółową klasyfikację tych materiałów w poszczególnych klasach. W artykule rozpatruje się nie same materiały niebezpieczne a konstrukcje do ich bezpiecznego transportu w klasie 4.1 załącznika „A" - ADR, czyli „materiały wybuchowe". Problem międzynarodowy polega na tym, że istnieją wytyczne jakie muszą spełniać konstrukcje do transportu materiałów wybuchowych a nadzór nad przestrzeganiem tych przepisów sprawują powołane do tego organy. W ogólnym przypadku instytucją dopuszczającą do użytkowania ww. urządzeń na podstawie własnej opinii jest Urząd Dozoru Technicznego (UDT) pozostawiając kwestię zasad projektowania urządzeń i sprzętu technicznego do transportu materiałów wybuchowych.

Obecnie główną i ostateczną formą weryfikacji przydatności zbiorników przeciwwybuchowych jest test poligonowy, w trakcie którego zbiornik ulega zniszczeniu lub nie, a jego wyniki służą do wydania opinii o dopuszczeniu lub odrzuceniu konstrukcji.

W artykule przedstawiono najnowsze możliwości wykorzystania symulacji komputerowych do projektowania zbiorników specjalnych. Obecnie możliwości metod komputerowych są tak dalece rozwinięte, że choć nie zastąpią metod eksperymentalnych (prób poligonowych) to mogą stanowić kompletną informację dla UDT o dopuszczeniu do użytkowania badanej konstrukcji. W Polsce nie obowiązują przepisy o konieczności dołączania, przy certyfikacji urządzeń do transportu materiałów niebezpiecznych, wyników symulacji numerycznych co jest standardem w wielu krajach. W Norwegii (w USA certyfikowanie wyrobów dla obronności) np. w przemyśle „offshore", każde urządzenie pracujące na platformie wiertniczej nie jest dopuszczone do użytkowania jeśli nie posiada w dokumentacji certyfikującej wyników symulacji komputerowej odporności na działanie ciśnienia od wybuchu.

Przedstawione w artykule materiały mogą przyczynić się do rozszerzenia wymagań certyfikacyjnych w kraju poprzez konieczność dołączania wyników symulacji komputerowej przy certyfikacji konstrukcji specjalnych a co za tym idzie do poprawy bezpieczeństwa w transporcie, czyli logistyce generalizując.

Przedmiot badań

Jak zaznaczono we wstępie w Europie obowiązuje umowa ADR o przewozie drogowym towarów niebezpiecznych m. in. rozważanych w pracy niewybuchów i niewypałów (Rys. 1).

W Polsce dokumentem uwzględniający ustalenia ARD to Rozporządzenie Ministrów: Spraw Wewnętrznych i Administracji, Obrony Narodowej, Finansów oraz Sprawiedliwości z dnia 2 sierpnia 2001 r., które określa warunki techniczne pojazdów specjalnych i pojazdów używanych do celów specjalnych. Treść tego rozporządzenia dotyczy oznakowania i warunków technicznych dotyczących np. odporność na korozję, zabezpieczenia instalacji elektrycznej i wylotu spalin a nie dotyczy warunków konstrukcyjnych. W dwunastostronicowym rozporządzeniu znajduje się kilkuakapitowy rozdział piąty o warunkach dodatkowych dla pojazdu przeznaczonego do przewozu dro-

[1] dr inż. Leszek Flis, ,Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni

Rys. 1. Wybuchy i niewypały szczególnie spotykane obecnie przy budowie nowych dróg i mostów
Źródło: [8]

gowego towarów niebezpiecznych, w którym czytamy, że „*…Pojazd, o którym mowa w ust. 1, przeznaczony do przewozu materiałów i przedmiotów wybuchowych uzbrojonych, musi ponadto być zbudowany w sposób zapewniający możliwość takiego umieszczenia ładunku wybuchowego, aby: rozrzut odłamków nie następował bezpośrednio w płaszczyźnie poziomej; strefa niebezpieczna dla ludzi związana z oddziaływaniem fali uderzeniowej (ciśnienie powyżej 0,1 atm), mierzona od centrum wybuchu, wynosiła: do 6,5 m dla ładunku do 2 kg TNT, do 9,0 m dla ładunku do 5 kg TNT. Spełnienie ww. warunków, musi być potwierdzone pozytywnym wynikiem badań weryfikacyjnych pojazdu przeprowadzonych z wykorzystaniem ładunków wybuchowych przez jednostkę akredytowaną...*”.

Z powyższego wynika fakt, że jedynym wymogiem na dopuszczenie do użytkowania ww. pojazdów i konstrukcji specjalnych jest badanie poligonowe. Eksperyment poligonowy jest oczywiście bezpośrednim i wiarygodnym źródłem potwierdzającym zarządzenia ujęte w rozporządzeniu ale nie ujmuje i nie wyjaśniają aspektów konstrukcyjnych, np. dotyczących reżimów pracy pojemników specjalnych (Rys. 2b), warunków granicznych, obciążeń czy stanu konstrukcji w trakcie lub po ewentualnej detonacji w jej wnętrzu. Nowym zagadnieniem, którego nie obejmuje rozporządzenie to wielokrotne wykorzystanie pojemników specjalnych przy wielokrotnych detonacjach w jego wnętrzu. Wykorzystanie w ostatnim przypadku symulacji numerycznych z wykorzystaniem najnowszych technik komputerowych rozwiązałoby wiele kwestii, dla których nie można uzyskać odpowiedzi przy wykorzystaniu eksperymentu.

a)

b)

Rys. 2. Dopuszczona forma przewozu materiałów niebezpiecznych przez wojsko wyłączona z rozporządzenia nr 992 z dnia 2 sierpnia 2011 r [6]. a) przyczepa z konstrukcją specjalną do przewozu niewybuchów i niewypałów zgodnie z rozporządzeniem nr 992 z dnia 2 sierpnia 2011 r. [7]
Źródło:[6,7]

Najnowsze konstrukcje zbiorników przeciwwybuchowych (Rys. 3) to konstrukcje gazoszczelne przeznaczone do ochrony ludzi i otoczenia przed dzia-

łaniem wszystkich skutków wybuchu materiału wybuchowego i substancji toksycznych mogących znajdować się w bagażach, przesyłkach lub innych przedmiotach niebezpiecznych. Mają one umożliwić wielokrotny, bezpieczny transport podejrzanych ładunków poza strefę przebywania ludzi, oraz pobieranie próbek gazów powybuchowych w razie zaistnienia eksplozji [9].

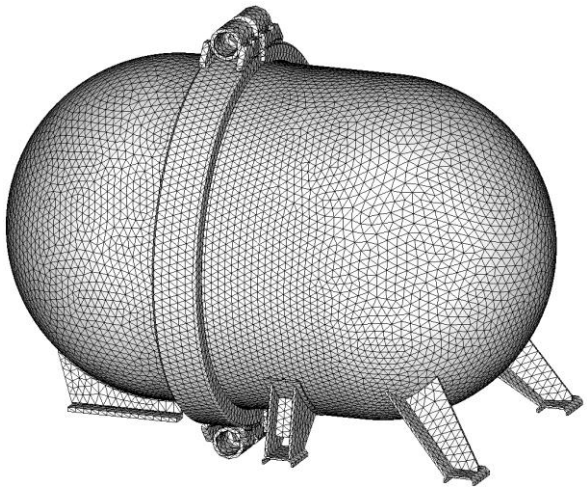
Rys. 3. Widok ogólny najnowszych konstrukcji zbiorników przeciwwybuchowych
Źródło:[9]

W dalszej części przedstawiono wykorzystanie najnowszy technik symulacji komputerowej do szacowania wytężenia konstrukcji na przykładzie zbiornika specjalnego. Z wcześniejsze symulacjami, mniej dokładnymi można zapoznać się w [2]. Wykonano obliczenia i porównano wyniki otrzymane dwiema metodami. Przedstawione symulacje mogą być wykorzystywane do analizy wytrzymałościowej konstrukcji przed wykonaniem prób poligonowych. Uzyskiwane dzięki symulacji informacje mogą uzupełniać wiedzę na temat przebiegu samej detonacji i wskazywać na miejsca, które mogą być zoptymalizowane w następnych projektach. Jak wcześniej wspomniano na wzór innych państw symulacje powinny być integralną częścią opinii UDT dopuszczającego ww. konstrukcję do użytkowania

Symulacja wytężenia zbiornika obciążonego ciśnieniem wybuchu

Metody modelowania numerycznego oprócz metody Smoothed Particle Hydrodynamics SPH, bazują głównie na Metodzie Elementów Skończonych MES, tu również użytej. Modelowanie numeryczne wybuchu wyczerpująco opisane jest m. in. w pozycjach [1,10-13], a metody możliwe do zastosowania to Multi-Material Arbitrary Lagrangian-Eulerian Method MM-ALE lub metoda Lagrange'a. Do symulacji wybuch w zbiorniku wybrano drugą metodę.

Symulację metodą elementów skończonych konstrukcji zbiornika specjalnego wykonano dla modelu geometrycznego (Rys. 3), który poddano dyskretyzacji jak na (Rys. 4). Obciążenie rzeczywistego zbiornika stanowi umieszczony centralnie w jego środku ładunek wybuchowy o masie 5 kg TNT.



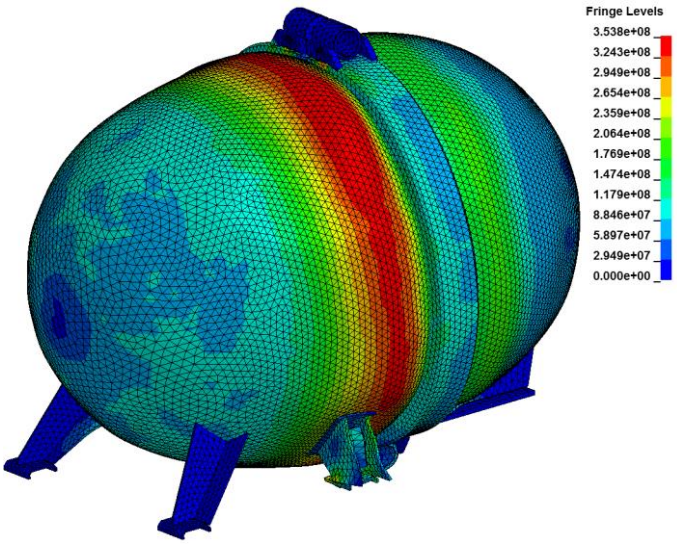
Rys. 4. Model dyskretny MES na potrzeby symulacji komputerowej
Źródło: Model dyskretny - opracowanie własne na podstawie modelu STL i koncepcji [9]

Podstawy teoretyczne są dziś dobrze znane i opisane a wszystkie sprowadzają się do opisu fali ciśnienia równaniem Friedlandera, co również zostało zastosowane w pracy (Rys. 6b).

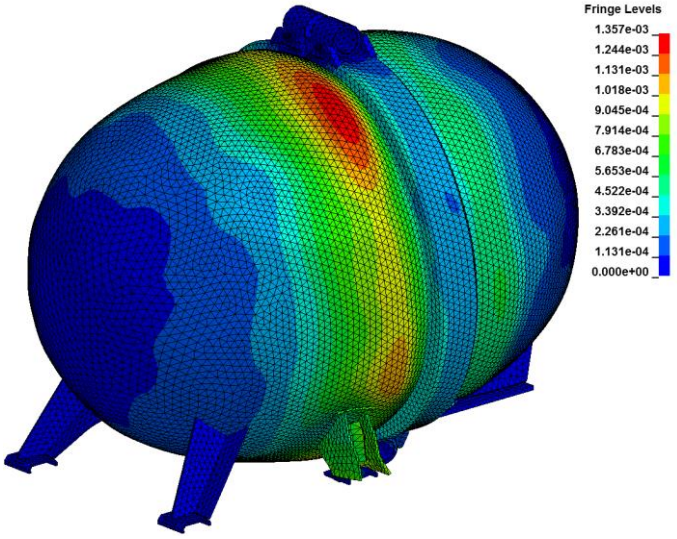
Jednym z najbardziej istotnych i trudnych do zidentyfikowania parametrów jakie są przedmiotem pomiarów na poligonie to ciśnienie wybuchu i ciśnienie na ściance zbiornika. Są to dwie różne wielkości a ich pomiar technicznie bardzo trudny do wykonania. Na ściankach zbiornika nie utrzymają się praktycznie żadne czujniki podczas wybuchu, dlatego też dobrym narzędziem do analizy konstrukcji obciążeniem wybuchem są metody komputerowe.

Znając wartości i przebieg ciśnienia wybuchu w czasie można w programach symulacyjnych obciążyć wewnętrzne ścianki konstrukcji i po obliczeniach obserwować przebieg wytężenia zbiornika (Rys. 5a) lub inne wielkości takie jak przemieszczenia (Rys. 5b). Ciśnienie od wybuchu może być zadawane jako obciążenie w czasie w postaci prostej funkcji (Rys. 6a) lub wyliczonej na podstawie wzorów literaturowych opartych o badania eksperymentalne (Rys. 6b). Na rysunkach (Rys. 7) przedstawiono naprężenia zredukowane jako wynik obliczeń dla modelu dyskretnego (Rys. 4) obciążonego wewnątrz ciśnieniem jak na (Rys. 6a) i naprężenia zredukowane (Rys. 8) obciążone ciśnieniem jak na (Rys. 6b)

a)

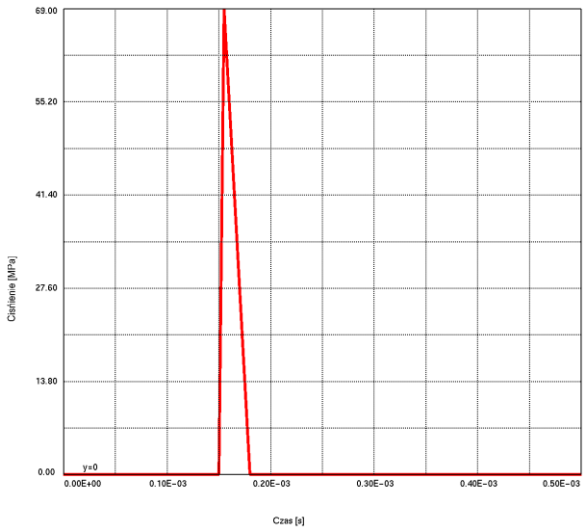


b)

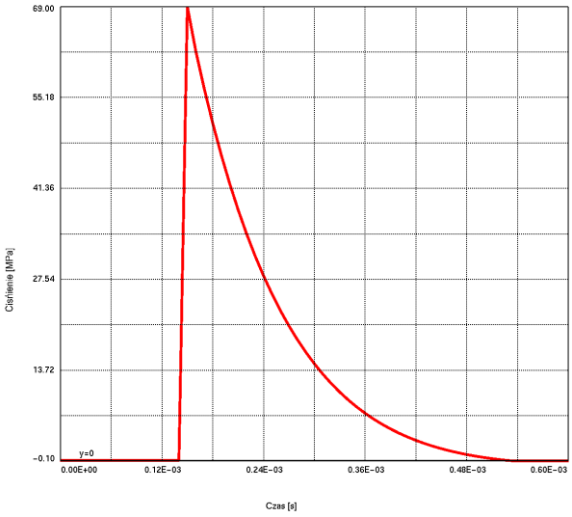


Rys. 5 Wyniki symulacji komputerowej a) naprężenia zredukowane HM w [MPa], b) przemieszczenia w [mm] – przeskalowanie x 100
Źródło: Symulacje opracowanie własne

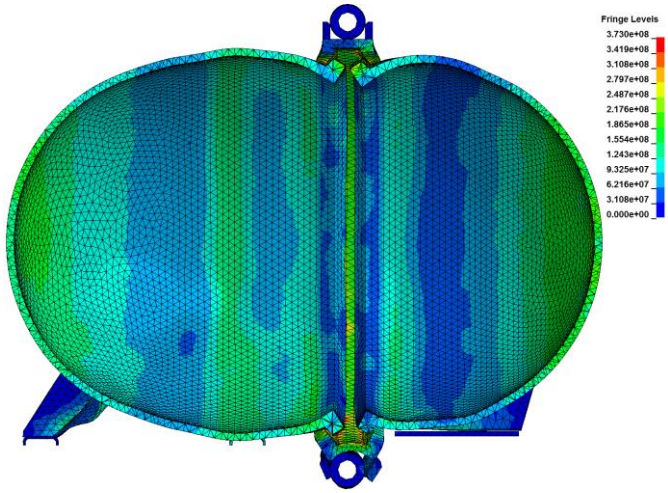
a)



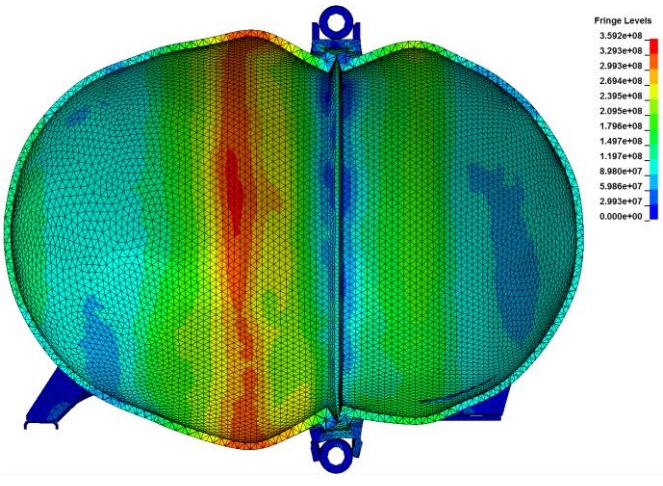
b)



Rys. 6 Uproszczony przebieg ciśnienia w funkcji czasu a) przebieg ciśnienia wyliczany w odniesieniu do eksperymentu w odniesieniu do danego ekwiwalentu TNT b)
Źródło: Opracowanie własne



Rys. 7. Naprężenia zredukowane obliczone przy obciążeniu ciśnieniem wg (Rys. 6a) – przeskalowanie x 100
Źródło: Symulacje opracowanie własne



Rys. 8. Naprężenia zredukowane obliczone przy obciążeniu ciśnieniem wg (Rys. 6b) – przeskalowanie x 100
Źródło: Symulacje opracowanie własne

Wyniki obliczonego naprężenia co do wartości maksymalnych są takie same, zarówno te obliczone wg charakterystyki danej krzywą (Rys. 6a) jak i (Rys. 6b). Widać natomiast różnicę w lokalnym rozkładzie naprężeni. Obciążenie ciśnieniem od wybuchu o charakterystyce jak na (Rys. 6b) wykazuje lokalne spiętrzenie naprężenia.

Atutem symulacji komputerowych jest fakt, że uzyskujemy wiele informacji przed zniszczeniem takiego zbiornika na poligonie lub nawet wcześniej przed jego produkcją.

Zamodelowanie ciśnienia wybuchu w zamkniętej przestrzeni, tak jak w przypadku rozpatrywanego zbiornika, powinno uwzględniać nadciśnienie, które panuje po wybuchu we wnętrzu. W wykonanych obliczeniach pominięto powyższy fakt a obciążenie stanowiło wyidealizowane ciśnienie, które co do swojej wartości maksymalnej wartości może odpowiadać rzeczywistości natomiast jego dalszy przebieg i skutki oddziaływania na konstrukcje już nie. W rzeczywistości ciśnienie wewnątrz zbiornika nie zanika do zera tak jak przyjęto w modelu lecz pozostaje w formie nadciśnienia.

Zakładając, że interesują nas warunki graniczne i aspekt czy konstrukcja wytrzyma ciśnienie maksymalne w pierwszej chwili po wybuchu, wyniki symulacji do czasu osiągniecia ciśnienia maksymalnego wybuchu spełniają to kryterium natomiast dalszy jej przebieg nie może już być wiarygodny. Dodatkowym argumentem uprawniającym do stwierdzenia, że przedstawione sposób modelowania wybuchu wewnątrz konstrukcji zamkniętej jest do przyjęcia - jest fakt, że obciążenie zbiornika realizowane było w zakresie sprężystym tuż przed osiągnięciem granicy plastyczności materiału konstrukcji.

Jak wspomniano na początku symulację pełnej interakcję gazów i konstrukcji można zrealizować wg metodyki ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian Method) dlatego w dalszych pracach planuje się taką symulację i ponowne przeliczenie przedstawionych przykładów. Powyższe pozwoli na ocenę uzyskanych w artykule wyników. Ostateczną weryfikację przeprowadzonych obliczeń mogą dać eksperymentalne badania poligonowe.

Streszczenie

Przedstawiono jedną z możliwości wykorzystania symulacji komputerowych do projektowania zbiorników specjalnych i wykorzystania uzyskiwanych wyników przez urząd dozoru technicznego przy wydawaniu opinii dopuszczających zbiorniki do użytkowania. Przedstawiono wyniki uproszczonego modelowania MES, oddziaływania ciśnienia wybuchu wewnątrz zbiornika. W obliczeniach pominięto interakcję gazów od wybuchu z wnętrzem zbiornika. Rozpatrywano tylko oddziaływanie określonej wartości ciśnienia na ściankę w jego wnętrzu w kilku pierwszych milisekundach, gdy konstrukcja poddawana jest maksymalnemu obciążeniu od ciśnienia.

Abstract

Presents one of the possible use of computer simulations to design special containers and use the results obtained by the technical inspection authority in issuing an opinion allowing tanks to use. Presents the results of a simplified FEM modeling, the impact of explosion pressure inside the tank. The calculations are omitted interaction of gases from the eruption of the interior of the tank. Considering only the impact of a particular pressure on the inside wall in the first few milliseconds, when the structure is subjected to the maximum load pressure.

Literatura

1. Dobrociński S., Stabilność rozwiązań odporności udarowej konstrukcji, 2000, AMW Gdynia.
2. Flis. L., Wykorzystanie system MES Ansys Autodyn do analizy zbiornika specjalnego. Acta mechanica et automatica vol. 2 no. 1 2008, pp. 21 to 26.
3. Kociołek K., Drogowy przewóz towarów niebezpiecznych, opracowanie własne.
4. Kociołek K., Górny M., Bezpieczeństwo w transporcie towarów niebezpiecznych w kontekście nowelizacji ADR 2011 i innych przepisów transportowych. Wydawnictwo Szkoły Aspirantów Państwowej Straży Pożarnej, 2011.
5. Grzegorczyk B., Hancyk Rafa B., Towary niebezpieczne w transporcie drogowym ADR 2007 – 2009". Wydawnictwo Buch-Car, Błonie 2007 r.
6. http://pl.wikipedia.org/wiki/ADR_%28transport%29
7. http://www.arex.pl/uploads/1_f506cb6bf78606e20f78ce5515055bfd.pdf
8. https://www.google.pl/search?q=niewybuchy+niewypa%C5%82y&biw=1920&bih=1063&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ei=7S89VJbJIo7YPJjbgMgH&ved=0CAYQ_AUoAQ
9. http://www.jakusz.com/oferta/pojemniki-przeciwwybuchowe.html
10. Nago T., Blast Loading and Blast Effects on Structures – An Overview, The University of Melbourne, Australia, 2007, EJSE Special Issue: Loading on Structures

11. Draganić H., Sigmund V., Blast loading on structures, 2012, Technical Gazette 19, 3, 643-652.
12. Małachowski J., Modelowanie I badania interakci ciało stałe – gaz przy oddziaływaniu impulsu ciśnienia na elementy konstrukcji rurociągu, 2010, Warszawa.
13. Dacko A., Zagadnienia modelowania i symulacji numerycznej dynamiki struktur obciążonych falą uderzeniową wybuchu, 1998, Springer.

"Obliczenia wykonano na komputerach Centrum Informatycznego Trójmiejskiej Akademickiej Sieci Komputerowej"
(Calculations were carried out at the Academic Computer Center in Gdańsk)"