

Warszawa, 21.08.2010 r.

Dr hab. Krzysztof Wiśniewski  
Docent, IPPT PAN  
Ul. Świętokrzyska 21  
00-049 Warszawa

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Norberta Tuśnio  
pt. „Numeryczna analiza wytrzymałości konstrukcji stalowych w warunkach pożaru”.

### Opis strony formalnej

Rozprawa liczy 180 stron i podzielona jest na 8 rozdziałów, uwzględniając wprowadzenie i podsumowanie końcowe. Podział na rozdziały jest nierównomierny, np. Rozdział 2 ma niecałe 4 strony a Rozdział 4 ma 58 stron. Rozprawa zawiera 17-to stronicową bibliografię, 2 załączniki i spis oznaczeń. Zamieszczono w niej 89 rysunków.

Rozprawa napisana jest językiem poprawnym i zrozumiałym chociaż nie zawsze precyzyjnym. Została dość starannie przygotowana od strony technicznej lecz zawiera usterki natury edytorskiej (brak numeracji niektórych wzorów, powtórzenia, paragrafy niedokończone logicznie, nazewnictwo używane w pożarnictwie przemieszane z nazewnictwem stosowanym w mechanice).

### Omówienie zakresu rozdziałów i uwagi o charakterze dyskusyjnym

We **Wprowadzeniu** (17 stron) zdefiniowano przedmiot badań podjętych w rozprawie oraz omówiono podstawy rozwoju pożarów w pomieszczeniach budynku i oddziaływanie pożaru na konstrukcję budynku. Krótko omówiono także kwestie bezpieczeństwa ludzi w warunkach pożaru.

W **Rozdziale 2** (3.5 strony) sformułowano cel i zakres pracy.

Zakres rozprawy obejmuje zagadnienia związane z modelowaniem numerycznym rozwoju pożaru i zachowania się konstrukcji stalowych w warunkach pożaru w celu umożliwienia analizy procesów przepływu ciepła i określenia deformacji konstrukcji pod wpływem pożaru. Cechy charakterystyczne pracy to:

1. Łączne modelowanie obu zagadnień i uwzględnienie sprzężenia pomiędzy nimi. W pracy założono, że sprzężenie jest jednokierunkowe, tzn. pole temperatury określane w modelu rozwoju pożaru jest przekazywane do modelu konstrukcji.
2. Opracowanie szeregu kwestii niezbędnych do zintegrowania i efektywnego przeprowadzenia analizy za pomocą dwóch dostępnych i znanych w programów obliczeniowych: FDS (ang. Fire Dynamics Simulation) i FEAP (ang. Finite

Element Analysis Program). Warto zaznaczyć, że program FDS znany jest w środowisku inżynierów pożarnictwa natomiast program FEAP w środowisku naukowym.

Oceniam, że są to zamierzenia złożone i trudne lecz bardzo ważne i perspektywiczne. Można bowiem przewidywać, że, wraz ze wzrostem mocy obliczeniowej komputerów, kody numeryczne będą w coraz większym stopniu wspierały projektantów. W szczególności powinny być wykorzystywane do poprawiania bezpieczeństwa pożarowego dużych i nietypowych obiektów (np. supermarketów, budynków użyteczności publicznej), w których modelowanie silnej konwekcji gorących gazów pożarowych jest niezbędne do zaprojektowania dróg i scenariuszy ewakuacyjnych. (Notabene, warto wspomnieć, że program symulacji rozwoju pożaru może też być i już był wykorzystywany w wyjaśnianiu przyczyn śmierci strażaków w trakcie gaszenia pożaru.) Co więcej, wydaje się, że w przyszłości warto dołączyć do tych dwóch programów trzeci program, identyfikujący stany krytyczne konstrukcji i ułatwiający jej przeprojektowywanie.

**Rozdział 3** (16 stron) zawiera przegląd literatury i został podzielony na 3 części dotyczące 1) modeli fizycznych, matematycznych i numerycznych rozważanych procesów, 2) modelowania polowego pożarów i 3) modelowania procesu deformacji i zniszczenia konstrukcji obciążonych termicznie. Rozdział ten zawiera przegląd dużej liczby prac ale niestety materiał jest niezbyt uporządkowany i czasami cytowania są bardzo ogólnikowe, jak np. zdanie „Wyniki eksperymentów numerycznych zachowania się niezabezpieczonych stalowych ram podczas pożaru opisane są w pracy [242].” wtrącone na str. 38. Za najbardziej wartościową część tego rozdziału uważam Tabelę 3.1 na str. 34, która zawiera zestawienie najbardziej znanych programów komputerowych CFD wykorzystywanych do modelowania pożarów.

**Rozdział 4** (59 stron) jest najbardziej obszerny w pracy i dotyczy badania rozwoju pożaru za pomocą programu numerycznego FDS służącego do modelowania przepływów wywołanych źródłem ciepła (ogniem, pożarem). Program ten rozwiązuje numerycznie równania Naviera-Stokesa dla małych prędkości przepływu i uwzględnia różne modele turbulencji, spalania i wymiany ciepła. Jest to dość szeroki zakres tematyczny i dlatego dobrze że Doktorant zamieścił w rozdziale 4 przegląd równań i technik obliczeniowych zastosowanych w programie FDS. Wydaje się, że przegląd ten został dobrze opracowany.

Szczególnie interesujący jest podrozdział 4.5, w którym Doktorant omawia problemy dotyczące zbieżności rozwiązania i wpływu parametrów na rozwiązanie przy czym kwestie te są badane przez Doktoranta za pomocą programu FDS. W związku z tym podrozdziałem nasuwają się następujące uwagi.

1. We wzorach na str. 71 (niestety podanych bez numeru) przybliżona jest pochodna  $dT/d \dot{Q}$ , gdzie  $T$  to temperatura a  $\dot{Q}$  to moc źródła ciepła. (Pomińmy kwestię, że wyrażenie w 3-ciej linii jest identyczne jak wyrażenie w 1-szej linii czyli jest zbędne.) Przybliżenie  $\Delta \dot{Q}$  zostało przyjęte jako  $0.1 \dot{Q}$ . Jeżeli obliczamy pochodną to dla liczb w podwójnej precyzji perturbacja powinna wynosić  $10^{-8} \dot{Q}$ , patrz np. [W.H. Press et al.: „Numerical Recipes in Fortran77”, 2<sup>nd</sup> ed., 1992, Rozdział 5.7. Numerical derivatives, eq.(5.7.5) ] gdzie omówiono to zgadnienie. W

tej sytuacji, wykres 4.11 i 4.12 na pewno nie pokazuje na osi pionowej pochodnej ale co najwyżej różnicę skończoną.

2. Dwie krótkie uwagi dotyczące doboru kroku czasowego, który jest sprawdzany dla predyktora prędkości. 1) Nie jest jasne co oznaczają 3 indeksy  $ijk$  we wzorze (4.79). To chyba powinny być składowe prędkości. 2) Wzór (4.80) jest niepoprawny; liczniki zamieniono z mianownikami. 3) Rys. 4.15: szkoda, że nie podano informacji jaka jest wartość  $\Delta t$  obliczana przez program, tzn. wynikająca z warunku CFL bądź Von Neumana. Monitorowanie tej wartości nie jest trudne.

**Rozdział 5** (12 stron) zawiera postawowe równania ciała 3-wymiarowego obciążonego termicznie dla materiału sprężystego i sprężysto-plastycznego z izotropowym wzmocnieniem. Równania dla materiału sprężystego uwzględniają efekt zmiany objętości wywołanej rozszerzalnością cieplną materiału. Kwestie te są klasyczne lecz zostały dobrze opisane i nie zgłaszam do tej części rozdziału żadnych uwag.

W związku z drugą częścią tego rozdziału, dotyczącą materiału sprężysto-plastycznego, nasuwają się następujące uwagi.

1. Wydaje się, że w podrozdziale 5.2 popełniono wielokrotnie błąd w cytowaniu i że zamiast [117] powinno być [118] lub któraś inna z prac Prof. Kosiorka dotycząca zależności stałych materiałowych od temperatury.
2. Na Rys. 5.1. i 5.2 porównano wykresy eksperymentalne i wykresy dla przybliżających je wzorów analitycznych dotyczące zależności modułu sprężystości i granicy plastyczności od temperatury. Podane wykresy różnią się w dość istotny sposób i dlatego lepiej jest nie stosować wzorów analitycznych lecz zamiast tego bezpośrednio wprowadzać dane eksperymentalne jako ciąg punktów i interpolować pomiędzy tymi punktami. Jest to bardzo dokładny i na dodatek niezbyt skomplikowany do zaimplementowania typowy sposób postępowania z danymi eksperymentalnymi w kodach numerycznych.

**Rozdział 6** (5 stron) omawia koncepcję połączenia programu do modelowania pożarów z programem do analizy deformacji konstrukcji, FDS i FEAP. Autor przyjął koncepcję łączenia tych dwóch programów za pomocą interfejsu przekształcającego wyniki (rozkład temperatur) z programu FDS na dane dla programu FEAP, służącego do analizy konstrukcji. W związku z tym nasuwają się następujące uwagi:

1. O ile wiem Autor dysponował wersjami źródłowymi obu programów więc nie jest do końca jasne dlaczego nie połączył ich bezpośrednio. Zaletą byłoby automatyczne przekazywanie danych w każdym kroku czasowym bez udziału użytkownika a także możliwość wykorzystania rozwiniętych funkcji programu FEAP, takich jak np. blokowe generowanie siatek i wizualizacji rezultatów, dla potrzeb programu FDS.
2. W chwili obecnej, sprzężenie pomiędzy wymienionymi programami jest jednokierunkowe, tzn. pole temperatury określone w programie FDS jest przekazywane do programu FEAP lecz zmieniające się temperaturowe warunki brzegowe dla konstrukcji nie są przekazywane do programu FDS. Połączenie obu

kodów na poziomie źródłowym umożliwiłoby ocenę wpływu i znaczenia wyżej wymienionego sprzężenia.

Pomimo, że jest to dość krótki rozdział uważam go za jeden z najbardziej interesujących w całej rozprawie.

**Rozdział 7** (24 strony) zawiera wyniki obliczeń dla 4 przykładów. W związku z tym rozdziałem nasuwają się następujące uwagi.

1. Podrozdział 7.1 zatytułowany jest „Analiza zniszczeniowa wybranych elementów – pojedyncze belki stalowe izolowane termicznie i nieizolowane” lecz w rzeczywistości pokazano kolejne fazy narastających dużych deformacji konstrukcji. Nie sformułowano kryteriów zniszczenia i wykorzystując podane wyniki nie można ocenić kiedy konstrukcja naprawdę ulegnie zniszczeniu. Natomiast analizowany jest wpływ takich parametrów jak: istnienie lub nie izolacji termicznej, uwzględnianie lub nie zależność modułu Younga od temperatury oraz wpływ uwzględnienia plastyczności na ugięcia belki. Stosowany jest model plastyczności ze wzmocnieniem izotropowym lecz nie podano w pracy wartości współczynnika wzmocnienia, a nawet w opisie nie występuje nazwa tego współczynnika, lecz jakiś „PLAStic MISes”, który jest nazwą swoistą dla FEAPa. Należy zauważyć, że nie uwzględniono w tej analizie: zmiany granicy plastyczności w funkcji temperatury, zmiany przewodności cieplnej w funkcji temperatury a przede wszystkim nie uwzględniono pełzania w podwyższonej temperaturze. Byłoby dobrze gdyby Doktorant ustosunkował się do kwestii pominięcia tych czynników w trakcie obrony publicznej.
2. Podrozdział 7.2 zawiera analizę deformacji szkieletu nośnego budynku w warunkach pożaru, przeprowadzaną za pomocą dwóch programów, FDS i FEAP. Autor prezentuje deformacje budynku jedno-, dwu- i trzy-kondygnacyjnego otrzymane za pomocą programu FEAP, natomiast nie zamieszcza żadnych map ilustrujących np. rozkład temperatury i prędkości, przepływ dymu itp, które można otrzymać za pomocą programu FDS. Wydaje się, że pominięcie tych map z całą pewnością zubaża pracę i nie jest dla mnie zrozumiałe dlaczego ich nie zamieszczono. Opis tego przykładu jest niekompletny; brakuje np. informacji o rozmiarach i właściwościach materiału dla słupów. Nie oszacowano wpływu uwzględnienia sprzężenia pomiędzy dwoma typami analizy przeprowadzonymi za pomocą obu wymienionych wcześniej programów, chociaż jest to właściwie jedyny przykład w rozprawie w którym oba typy analizy występują i było to możliwe.
3. Podrozdział 7.3 zatytułowany jest „Obliczenia rozkładu temperatury i symulacje procesu deformacji wybranych elementów konstrukcji w czasie rozwoju pożaru” lecz niestety nie zamieszczono wyników dotyczących symulacji procesu deformacji elementów konstrukcji. W punkcie 7.3.3 zatytułowanym „Analiza obliczonego rozkładu temperatury w hali” nie przeprowadzono analizy lecz wymieniono tylko numery rysunków zawierających wyniki. Wydaje się, że podrozdział 7.3. nie został jeszcze zakończony.
4. Podrozdział 7.4 dotyczy symulacji procesu deformacji jednej z belek nośnych hali. Warto zauważyć, że wyrażenie na linię ugięcia belki (7.1) nie zawiera członów zależnych od temperatury powstaje więc pytanie w jaki sposób otrzymano wykresy

pokazane na Rys. 7.34. Niestety w pracy tego nie wyjaśniono, więc warto by autor odniósł się do tej kwestii w trakcie obrony pracy.

**Ogólna ocena merytoryczna pracy.** Moja ocena ogólna przedłożonej rozprawy jest pozytywna, ponieważ Doktorant osiągnął następujące wartościowe rezultaty.

1. Opanował i w sposób kompetentny opisał podstawy teoretyczne mechaniki płynów w zakresie przepływów wywołanych źródłami termicznymi w sformułowaniu odpowiednim do analiz numerycznych. Dokonał przeglądu szeregu zagadnień szczegółowych mających wpływ na efektywne obliczenie takich problemów. Są to bardzo trudne zagadnienia i nie ulega wątpliwości, że Doktorant dobrze je opanował.
2. Zaproponował połączenie programu FDS i FEAP, co uważam za niezwykle trafne i przyszłościowe z inżynierskiego punktu widzenia, i opracował interfejs pozwalający przekazywać pola temperatury z programu FDS do programu FEAP. Wykazał się dużą biegłością w posługiwaniu się tymi bardzo złożonymi środowiskami programistycznym. Zaimplementował kilka dodatkowych opcji w tych programach, między innymi umożliwiających uwzględnienie zależności stałych materiałowych od temperatury oraz automatycznie zagęszczających siatkę w obszarach dużych gradientów. W wyniku rozprawy powstał program, który może być wykorzystany przez biegłych inżynierów pożarnictwa do odtwarzania przebiegu pożaru i zdarzeń z nim związanych.
3. Obliczył cały szereg przykładów numerycznych testujących i ilustrujących możliwości tych programów, w tym także kilka bardzo trudnych. W kilku przypadkach zestawiał wyniki badań eksperymentalnych z wynikami obliczeń co jest szczególnie cenne.

**Wniosek końcowy.** Uważam, że przedstawiona rozprawa mgr inż. Norberta Tuśnio spełnia wymagania stawiane przez Ustawę pracom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

K. Wiśniewski  
21.08.2010 r.