

Recenzja

pracy doktorskiej mgr inż. Iwony Pokorskiej-Silva

**pt. „Analiza efektywności termicznej budynków na podstawie badań doświadczalnych
i symulacji numerycznych”**

wykonanej na Wydziale Budownictwa, Politechniki Śląskiej w Gliwicach.

Promotor: dr hab. inż. Lidia Fedorowicz, prof. Pol.Śl.

Promotor pomocniczy: dr inż. Artur Nowoświat

1. Podstawa opracowania recenzji

Recenzję opracowano na podstawie uchwały Rady Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej w Gliwicach z dnia 4.07.2018 r. o powołaniu recenzenta oraz na prośbę Pani Dziekan Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej – prof. dr hab. inż. Joanny Bzówki, z dnia 13.07.2018 r., sformułowaną w piśmie RB-0/4020/17/18.

2. Ocena zasadności podjęcia tematu

Współczesne podejście do projektowania budynków w tym wszelkiego rodzaju analiz fizyko-budowlanych wymaga stosowania zaawansowanych, dynamicznych metod obliczeniowych. Dokładność odwzorowania stanu rzeczywistego jak i poprawność samych obliczeń jest silnie zależna od prawidłowo przyjętych warunków początkowych, brzegowych jak i matematycznego opisu samego zjawiska. Stateczność cieplna przegród budowlanych

oraz samego budynku jest zagadnieniem istotnym w przypadku obiektów wyposażonych w system sterowania i dobowej regulacji temperatury, czyli w większości współcześnie projektowanych budynków. Jest ona wyrażana za pomocą tzw. stałej czasowej, lub jak podają Autorka „czasu stygnięcia” albo „wskaźnika utrzymania ciepła”, wyrażonych w godzinach. Wspomniane parametry są szczególnie istotne w przypadku stosowania metod stacjonarnych lub quasi-dynamicznych w obliczeniach energetycznych budynków. Należy podkreślić, że jak dotychczas nie opracowano krajowych danych dla potrzeb wyżej wymienionych metod, w tym metody miesięcznej opisanej w PN-EN 13790. Przedstawione w pracy podejście jak i uzyskane wyniki analizy mogą w przyszłości posłużyć wyznaczeniu potrzebnych danych do obliczeń takich jak stałej czasowej odniesienia $\tau_{H,0}$ i referencyjnego parametru liczbowego $a_{H,0}$, charakterystycznych dla typowych budynków występujących w Polsce. Tym samym należy stwierdzić, iż podjęty temat rozprawy jest zarówno ważny i cenny z naukowego punktu widzenia jak i posiada istotną wartość utylitarną.

3. Krótka charakterystyka pracy i zakres rozprawy

Praca pt. „Analiza efektywności termicznej budynków na podstawie badań doświadczalnych i symulacji numerycznych” została przygotowana w formie maszynopisu i liczy łącznie 145 stron. Zawiera 161 rysunków i 26 tabel. Składa się z 10 rozdziałów i 3 załączników. W pracy zamieszczono wykaz oznaczeń, streszczenie w języku polskim i angielskim oraz wykaz tabel i rysunków.

Rozdział 1 to krótkie wprowadzenie czytelnika w tematykę rozprawy. Natomiast cel, jej zakres oraz tezy pracy sformułowano w osobnym rozdziale nr 2. Objętość obu rozdziałów to zaledwie 5 stron.

Rozdział 3 poświęcony jest przedstawieniu podstawowych informacji na temat oddziaływania promieniowania słonecznego na budynek a także bilansu cieplnego budynku. Rozdział ten wraz z rozdziałem 4 jest przytoczeniem podstawowych informacji literaturowych.

W rozdziale 5, zawierającym jedynie 1 podrozdział, przedstawiono podstawy działania programów symulacyjnych, ze szczególnym uwzględnieniem programu ESP-r i pokazaniem sposobu dyskretyzacji modelu w czasie i przestrzeni. Przedstawiono przykładowe wyniki symulacji obiektu jednostrefowego.

Rozdział 6 poświęcono problematyce opracowania danych klimatycznych dla potrzeb obliczeń symulacyjnych. Przedstawiono dane Typowego Roku Meteorologicznego oraz statystyczną analizę wyników pomiarów parametrów klimatu lokalnego uzyskanych za pomocą stanowiska pomiarowego zainstalowanego na budynku Politechniki Śląskiej.

Rozdziały 7, 8 i 9 stanowią moim zdaniem najistotniejszą część pracy i zawierają oryginalne osiągnięcia Autorki. W rozdziale 7 omówiono wyniki eksperymentu laboratoryjnego wykonanego na modelu w skali mikro. Głównym celem było zbadanie procesu stygnięcia przedmiotowego obiektu. Wyniki pokazane w rozdziale 8 uzyskano na budynku w skali półrzeczywistej, będącym fragmentem stanowiska instalacji eksperymentalnej Katedry Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli. Podobnie jak poprzednio badano dynamiczne zachowanie się obiektu w różnych scenariuszach obciążenia cieplnego. Nieco inny charakter miał eksperyment przeprowadzony w budynku rzeczywistym w kształcie kopuły, gdzie monitorowano obciążenia cieplne powłoki w wyniku dynamicznego oddziaływania środowiska zewnętrznego. Ten zakres badań, choć nie stoi w sprzeczności, jest jednak nieco oderwany od wcześniejszych analiz.

Ostatni 10 rozdział to podsumowanie pracy i wnioski wynikające z przeprowadzonych badań i analiz.

W pracy powołano się na 111 pozycji bibliograficznych oraz 13 norm i dokumentów. W dużej mierze są to prace, które ukazały się po roku 2000, zaś w kilku przypadkach po roku 2010. Należą do nich prace własne doktorantki.

4. Ocena formalna

Przedstawiona praca ma charakter badawczo - teoretyczny i obejmuje zagadnienia fizyki cieplnej budowli. Cel ogólny sformułowany przez Doktorantkę na stronie 10 rozprawy polegał na znalezieniu relacji pomiędzy wynikami badań, w skali laboratoryjnej i rzeczywistej, a wynikami symulacji numerycznej. Realizacja powyższego celu powinna także potwierdzić poprawność przyjętych modeli lub, jak należy wnioskować z treści pracy, służyć ich kalibracji. Ten aspekt nie został jednak nigdzie podkreślony w treści recenzowanej rozprawy. Ponadto Autorka sformułowała następujące cele pośrednie polegające na wykonaniu:

- „analizy wiarygodności odpowiedzi termicznej obiektu testowego w badaniach laboratoryjnych i symulacjach”,
- „analizy odpowiedzi termicznej i energetycznej w obiekcie badawczym o przegrodach wykonanych w technologii szkieletowej”,
- „badań nad wykazaniem użyteczności symulacji termicznych w zagadnieniach pozornie prostych”.

Stwierdzam, że założone i przedstawione powyżej cele zostały zrealizowane przez Doktorantkę za pomocą poprawnie dobranych metod badawczych, wyników przeprowadzonych eksperymentów oraz wyników symulacji uzyskanych za pomocą wstępnie skalibrowanych modeli obliczeniowych.

Autorka sformułowała 2 tezy pracy. Teza 1 jest moim zdaniem niezwykle ogólna, dość oczywista i możliwa do udowodnienia jedynie dla badanych przypadków. Właściwa predykcja zachowania się „określonych układów”, rozumiem, że chodzi o wybrane procesy fizyczne zachodzące w tych układach, możliwa jest do wykazania właśnie poprzez weryfikację modelu komputerowego. Teza 2 choć o podobnym stopniu ogólności jest dla mnie zdecydowanie trafniej sformułowana i tak jak zdefiniowała to sama Autorka jest ona „kontynuacją” a w zasadzie doprecyzowaniem tezy 1. Uważam bowiem, że badania przeprowadzone w pracy mają charakter analiz parametrycznych, wpływu zmienności poszczególnych parametrów modelu, głównie warunków brzegowych na poprawność wyników uzyskanych metodą symulacyjną.

Praca ma klasyczny układ rozprawy doktorskiej. Rozpoczyna się przeglądem literatury w zakresie przedmiotu prowadzonych badań. Trzy główne rozdziały (7, 8 i 9) zawierają zarówno elementy badań jak i symulacji, przez co widoczne jest wzajemne powiązanie obu tych obszarów. Szczegółowe wnioski znajdują się na końcu poszczególnych rozdziałów a dodatkowo w podsumowaniu zamieszczonym na końcu pracy. Uzyskane wyniki zostały bardzo precyzyjnie opracowane pod względem statystycznym. Doktorantka dokonała podsumowania przeprowadzonych badań (osobno dla każdego z trzech obszarów A, B i C,) oraz odniosła się do przyjętych tez uznając, że zostały one sformułowane poprawnie.

W mojej opinii praca jest zredagowana poprawnie a mnogość analiz świadczy o tym, że Doktorantka starała się dokonać jak najbardziej kompleksowej oceny wybranych rozwiązań. Badania opisane w rozdziałach 7 i 8 są spójne i różnią się od analiz zamieszczonych

w rozdziale 9. Szkoda, że również w tym trzecim przypadku nie próbowano wyznaczyć stałej czasowej co byłoby naturalnym dopełnieniem dwóch poprzednich analiz.

Praca napisana jest prawidłową polszczyzną. Autorka nie stroni od szczegółowej analizy uzyskanych wyników na każdym etapie pracy. Jest precyzyjna i rzetelna w formułowaniu własnych opinii. Na szczególną pochwałę zasługuje analiza statystyczna wyników. Ważne jest, że Doktorantka podchodzi z dystansem do uzyskanych rezultatów pomiarów zdając sobie sprawę z dokładności urządzeń pomiarowych jak i niepewności samego pomiaru. Drobne błędy o charakterze ogólnym bądź redakcyjnym wykazane w dalszej części recenzji nie mają wpływu na całościową, bardzo pozytywną ocenę.

5. Ocena merytoryczna

Z uwagi na trafnie sformułowany problem badawczy, szeroki zakres badań i analiz, prawidłową interpretację uzyskanych wyników oraz umiejętność sformułowania wniosków moja ocena merytoryczna prezentowanej pracy jest bardzo wysoka. Jednakże dokładna analiza nakłada na mnie obowiązek sformułowania kilku uwag o charakterze dyskusyjnym, nie umniejszających jednak pierwotnej oceny.

5.1. Uwagi krytyczne wymagające odpowiedzi w czasie publicznej obrony

Pierwsza uwaga dotyczy kluczowego sformułowania zamieszczonego w tytule, czyli „efektywności energetycznej budynków”, które nie zostało zdefiniowane przez Autorkę opracowania. Proszę o doprecyzowanie tego pojęcia w kontekście prezentowanych wyników, zaś w szczególności wielkości pośrednio mających wpływ na efektywność energetyczną. Należą do nich z pewnością izolacyjność i stateczność cieplna przegród. Jakim mierzalnym parametrem (lub wieloma parametrami) możliwe jest określenie ogólnej efektywności termiczna budynku?

Uwaga druga związana jest z parametrami wyznaczanymi podczas badań i symulacji, zarówno obiektu w skali laboratoryjnej jak i półrzeczywistej. W pracy pojawiają się wielkości takie jak: czas stygnięcia t [h], wskaźnik utrzymania ciepła z [h]. Czy pojęcia czas stygnięcia i czas wychładzania są tożsame? Czy jeden z wspomnianych parametrów można wyznaczyć na podstawie wykresu stygnięcia obiektu (np. rys. 7.8, str. 61)? Jak te wielkości korespondują z ogólnie znanym pojęciem stałej czasowej budynku?

5.2. Pozostałe uwagi merytoryczne

Proszę o doprecyzowanie co Autorka rozumie pod pojęciem „warunki” (str. 10) w następującym zdaniu „W kolejnych rozdziałach pracy wprowadzane są i sprawdzane warunki, przy jakiej zmienności parametrów modelu ...”?

Jak należy interpretować sformułowanie „... odpowiedź energetyczną w obiekcie ...”, str. 11? Czy jest to np. chwilowy strumień ciepła dostarczony do układu? W jaki sposób „odpowiedź energetyczna” została wyznaczona przez Autorkę rozprawy?

Proszę o podanie definicji współczynnika jasności k_T (str. 15). Brak jest umieszczenia tego symbolu w spisie oznaczeń. Czy w tym przypadku mowa jest o jasności niebosłonu?

Autorka w kilku miejscach stosuje skróty myślowe, na przykład na str. 31. Jak należy rozumieć sformułowania, że „układ i bezpośrednie otoczenie układu są odizolowane od otoczenia termodynamicznego, mimo że temperatura otoczenia układu nie jest stała” oraz „masę termiczną układu wyrażonego oporem cieplnym”?

Jak wynika z rysunku 6.2 (str. 46) pyranometr zamontowany jest na stanowisku w pozycji pionowej. W jaki sposób (jakim modelem) przeliczano pomierzone wartości napromieniowania na płaszczyznę pionową na wartości na płaszczyźnie poziomej?

Jakiego miasta dotyczą dane TRM zamieszczone na stronach 47 i 48 (rys. 6.3-6.9)?

Jakie źródło ciepła zastosowano w badaniach obiektu jednostrefowego, str. 56. Co stanowiło „punktowe źródło ciepła o maksymalnej mocy 200 W”? Jaki rodzaj wymiany ciepła dominował we wnętrzu obiektu?

Dla jakiego punktu pomiarowego przedstawiono wyniki zamieszczone na rys. 7.6, str. 60? Czy jest to punkt oznaczony nr 2, czyli temperatura powietrza w komorze, czy też temperatura jednej z powierzchni?

Jak należy wnioskować z informacji zawartej na str. 61, Autorka dokonała rozwiązania zadania odwrotnego. W jaki sposób oceniono „istotność” a następnie na jakiej podstawie ustalono wartości następujących parametrów: ρ , c , λ , ε , α ? Dlaczego współczynnik przewodzenia ciepła izolacji (λ_2) jest jak pisze Autorka na str. 62 nieistotny, choć w dalszej części uwzględniany jest w obliczeniach?

Wnioski przedstawione na str. 71, o następującej treści:

- wraz ze wzrostem wskaźnika utrzymania ciepła wzrasta czas stygnięcia obiektu, oraz

- czas stygnięcia strefy jest niewiele dłuższy niż czas stygnięcia przegrody,

są dość oczywiste i właściwe jedynie dla analizowanego przypadku odbiegającego od rzeczywistego zachowania się budynku, w którym oprócz strumienia strat ciepła przez przenikanie występuje strumień strat ciepła na drodze wymiany powietrza.

W przypadku budynku w skali półrzeczywistej (str. 74-75) proszę o doprecyzowanie czy budynek był wentylowany w czasie prowadzenia pomiarów oraz czy próbowano oszacować strumień powietrza infiltrującego, co mogło mieć wpływ na uzyskane wyniki? Moim zdaniem wpływ infiltracji wyraża się między innymi w niższym współczynniku korelacji wyliczonym dla zestawu wyników pokazanych na str. 83.

Proszę o doprecyzowanie jaka była dokładna lokalizacji punktów 1, 2 i 3 w obiekcie przedstawionym na str. 74 (budynek eksperymentalny Katedry BOiFB). Pytanie to jest zasadne w kontekście interpretacji wyników i określenia źródeł różnic w przebiegu temperatury, pokazanych na rys. 8.14 (str. 79).

Proszę o wyjaśnienie dlaczego w symulacji przyjęto „lepsze niż w rzeczywistości parametry materiałowe przegród” (str. 84)? Na jakiej podstawie określano właściwości fizyczne zastosowanych materiałów? Dlaczego w symulacji nie przyjęto adekwatnego systemu ogrzewania zamiast systemu idealnego?

W przypadku modelu kopuły żelbetowej brak jest precyzyjnego określenia poszczególnych punktów pomiarowych (rys. 9.19 (str. 94), dla których wyniki przedstawiono na rys. 9.21-32 oraz w tabeli 9.2. Dziwi wysoka wartość temperatury w punkcie N_22,5°, gdyż jak należy się domyślać litera N oznacza orientację północną wspomnianej płaszczyzny.

Co oznacza określenie „... dni o możliwie najbliższych przebiegach parametrów klimatu ...” (str. 107)?

Proszę o doprecyzowanie jaki mechanizm wymiany ciepła na powierzchni przyjęto w analizach symulacyjnych budynku w kształcie kopuły? Czy współczynniki przejmowania ciepła na drodze konwekcji były przyjęte jako stałe czy też zależne na przykład od prędkości wiatru?

6. Uwagi o charakterze edytorskim i ogólnym

Graficzne przedstawienie wyników w postaci wykresów nie zawsze jest czytelne. Część z nich, jak np. 6.27 jest wydrukowana w zbyt małej skali. Na rysunku 7.4 pewne linie są niewidoczne. Inne jak np. rys. 8.22 dają obraz gęsto nałożonych na siebie linii przez co mają jedynie charakter poglądowy.

Str. 8, jest „z przedziału”, powinno być „z grupy”;

Str. 9, jest „nymeryczny”, powinno być „numeryczny”;

W wielu miejscach pojawia się pojęcie „krzywej” (np. str. 11), choć bardziej poprawne byłoby użycie określenia „funkcja”.

Str. 12, jest „Badania i analizy ...”, powinno być „Wyniki badań i analiz ...”

W wielu miejscach w pracy (na przykład str. 13, 49, 58, 88) pojawia się pojęcie temperatury używanej w liczbie mnogiej. Różnicę temperatury należy zawsze podawać w Kelwinach, na przykład wartości na str. 111.

Str. 13, jest „odbicie przez powierzchnię”, powinno być „częściowe odbicie od powierzchni”;

W fizyce budowli bardziej powszechne jest używanie określenia „współczynnik przejmowania ciepła”, ewentualnie „współczynnik wnikania ciepła”, niż jak podaje Autorka na stronie 19, „współczynnik wymiany ciepła”.

Czasami brak jest pojedynczych oznaczeń w tekście (na przykład str. 21) lub w spisie symboli.

Wzory w tekście zostały ponumerowane jednak numeracja nie jest jednolita, np. str. 28.

Str. 38, jest „ponad to”, powinno być „ponadto”;

Str. 40, jest „Clark-Nicolsona”, powinno być „Crank-Nicolsona”;

Str. 41, jest „klimatycznej”, powinno być „klimatyzacyjnej”;

Str. 49, jest „zewnetrznego”, powinno być „zewnętrznego”;

Str. 58, na rys. 7.4 widocznych jest jedynie 6 linii, zaś w opisie legendy jest łącznie 10 pomiarów. Podobnie brak linii r(8.2) na rysunku 8.16, str. 80.

Str. 64, rys. 7.11, jest „g”, powinno być „ ρ ”;

Str. 68, poniższe sformułowanie „Wyniki powyższych badań można utożsamiać z wymogami tezy II.”, jest niefortunne;

Str. 69, w tabeli 7.7 brakuje danych dotyczących grubości poszczególnych warstw w ramach każdego wariantu;

Str. 71, sformułowanie „czas utraty temperatury” jest niefortunne;

Str. 87, jest „dą”, powinno być „są”;

Str. 110, sformułowanie „... przeniesienie praktyk w postaci symulacji z krokiem czasowym równym 1 godzinie, ...” jest niezrozumiałe.

Str. 117, sformułowanie „... zachowanie obiektu w granicach ekonomicznych i praktycznych ...” jest niefortunne.

7. Wniosek końcowy

Uwagi jakie zawarłem w swojej opinii w dużym stopniu mają charakter dyskusyjny i nie podważają w istotny sposób wartości naukowej pracy, jak również nie obniżają bardzo pozytywnej oceny samej Doktorantki. Stwierdzam, że Autorka opracowania podejmując istotny problem badawczy rozwiązała go samodzielnie, poprawnymi metodami naukowymi przez co wykazała się umiejętnością wymaganą od osób ubiegających się o stopień doktora. Otrzymane wyniki wnoszą nowe elementy do wiedzy na temat efektywności energetycznej budynków jak i wielkości z nią powiązanych, które obok aspektu poznawczego posiadają również wartość użytkową.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pani mgr inż. Iwony Pokorskiej-Silva pt.: „Analiza efektywności termicznej budynków na podstawie badań doświadczalnych i symulacji numerycznych” spełnia wymagania art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki wraz z późniejszymi zmianami, dlatego wnioskuję do Rady Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej w Gliwicach o jej przyjęcie i dopuszczenie Kandydatki do publicznej obrony.



Dr hab. inż. Dariusz Heim, prof. PŁ