

dr hab. inż. Agnieszka Lechowska, prof. PK
Politechnika Krakowska
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Laboratorium Ogrzewnictwa, Wentylacji, Klimatyzacji i Chłodnictwa
ul. Warszawska 24
31-155 Kraków

Kraków, 12.09.2022

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Tomasza Krzysztofa Kułakowskiego nt.:
***Modelowanie i analiza procesów wymiany ciepła
w oszkleniu wypełnionym materiałem fazowo-zmiennym***

Opinia została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej, dr hab. inż. Konrada Lewczuka, prof. PW, pismo nr WTBD.521.DR.149.2022 z dnia 14.07.2022.

Promotorem rozprawy doktorskiej jest dr hab. inż. Dariusz Heim, prof. Politechniki Łódzkiej, zaś promotorem pomocniczym dr inż. Arkadiusz Węglarz.

1. Zawartość rozprawy oraz ocena merytoryczna

Recenzowana rozprawa doktorska obejmuje 175 stron, w tym 114 rysunków, 19 tabel, wykaz oznaczeń oraz spis wykorzystanej literatury zawierający łącznie 86 publikacji naukowych i książek. Spośród wspomnianych 86 pozycji literatury, 10 to opracowania napisane w języku polskim a pozostałe są napisane w języku angielskim. Do rozprawy dołączono streszczenie w języku polskim i angielskim. Na początku pracy znajduje się spis głównych symboli, niezbędny przy braku opisów pod wzorami. Rozdział 1 i 2 to streszczenia napisane odpowiednio w języku polskim i angielskim.

W rozdziale 3, we wstępie, podano informacje wprowadzające związane z potrzebą obniżania energochłonności budynków, w tym poszukiwania rozwiązań innowacyjnych przegród budowlanych, głównie okien, aby zapewniając komfort cieplny oraz dostępność promieniowania słonecznego użytkownikom budynków, zmierzać do jak najmniejszego zużycia energii przez budynek. Podano spotykane w literaturze rozwiązania obniżające straty ciepła przez okna, jednak skupiono się na materiałach fazowo-zmiennych (MFZ) będących przedmiotem analizy. Dość obszernie je scharakteryzowano pod względem materiałowym oraz podano elementy budynku, w których istnieją możliwości zastosowania MFZ. W rozdziale tym podano również i krótko opisano istniejące metody numeryczne rozwiązywania równań nieustalonej wymiany ciepła oraz wskazano komercyjne programy użytkowe wykonujące takie obliczenia. Autor wskazał potrzebę teoretycznej analizy procesów zachodzących w oszkleniu wypełnionym MFZ w celu analizy wpływu takiego rozwiązania na bilans cieplny przegrody.

Rozdział 4 prezentuje tezy pracy oraz jej cel i zakres. Sformułowano dwie tezy pracy. Pierwsza dotyczy możliwości opracowania zmodyfikowanego algorytmu numerycznego przeprowadzającego jednowymiarowe obliczenia symulujące zarówno przepływ ciepła w oszkleniu z warstwą MFZ w postaci przewodzenia ciepła, jak i promieniowania słonecznego. W drugiej tezie autor stwierdza, że jest możliwe określenie niezbędnych parametrów MFZ w oszkleniu, aby dla warunków klimatycznych w Polsce obniżyć energochłonność analizowanego oszklenia wbudowanego w przegrodzie w stosunku do takiego samego rozwiązania bez MFZ. W rozdziale tym podano też cel pracy - opracowanie algorytmu służącego analizie numerycznej wymiany ciepła w oszkleniu z wypełnieniem MFZ oraz weryfikację wyników obliczeń z modelu za pomocą pomiarów. Podano też zakres pracy w sposób syntetyczny.

W rozdziale 5 wybrano metodę numeryczną rozwiązywania równań nieustalonego przewodzenia ciepła wraz z przemianą fazową w jednym z materiałów. Podano ogólne wzory opisujące zjawisko oraz wprowadzone uzasadnione uproszczenia równania ogólnego. Zapis całkowity uproszczono do zapisu

różniczkowego, aby możliwe było zastosowanie metody numerycznej rozwiązywania równania ogólnego poprzez wprowadzenie schematów różnicowych. Zdecydowano się na zastosowanie metody objętości skończonych (kontrolnych) (Control Volume Method). Moim zdaniem jest ona wystarczająca do analizy jednowymiarowej.

Rozdział 6 opisuje weryfikację opracowanego przez autora pracy algorytmu obliczeniowego. Weryfikacja została wykonana w dwóch etapach. Pierwszy etap objął weryfikację modelu nieustalonego przewodzenia ciepła przez oszklenie bez przemiany fazowej. Wykonano szeroką analizę zbieżności wyników obliczeń symulacyjnych przy wykorzystaniu metody objętości skończonych ze schematem różnicowym wstecznym niejawnym z wynikami takiego samego problemu przewodzenia ciepła rozwiązanego w sposób dokładny. Oprócz wizualnego porównania wykresów przebiegów wynikowych temperatur (co jest mało istotne) zostały przeanalizowane wartości błędów R, czyli sumy iloczynów kwadratów residuów po kolejnych krokach czasowych. Analizę zbieżności wyników symulacji z wynikami dokładnymi wykonano dla wybranych różnych kroków czasowych i różnych wielkości elementów. Najmniejsze (czyli pożądane) wartości błędów R otrzymano dla małych kroków czasowych oraz małych wielkości elementów (grubości warstw podziału przegrody). Gdyby otrzymano inne wyniki analizy, wówczas można byłoby się spodziewać, że zagadnienie jest źle uwarunkowane. Dodatkowo, dla tych samych wybranych kroków czasowych oraz rozmiarów elementów zbadano także uwarunkowanie macierzy współczynników - zbadano ilorazy największej do najmniejszej wartości własnej macierzy współczynników. Wyciągnięto ponownie słuszny wniosek, że zbieżność algorytmu numerycznego z rozwiązaniem dokładnym jest łatwiej osiągnięta dla małych kroków czasowych oraz dużej ilości podziałów analizowanej przegrody na elementy. Pozwoliło to na stwierdzenie, że problem nieustalonego przewodzenia ciepła przez przegrodę został rozwiązany prawidłowo. Drugi etap weryfikacji opracowanego przez autora algorytmu obejmował porównanie wyników symulacji nieustalonego przewodzenia ciepła już razem z przemianą fazową z wynikami rozwiązania ścisłego zagadnienia opracowanego przez Stefana. Aby uprościć nieliniowy problem przemiany fazowej, autor wybrał metodę modyfikacji ciepła właściwego, co według mnie jest bardzo dobrym podejściem, często z powodzeniem stosowanym. Ponownie dokonano porównania wyników rozwiązania dokładnego z rozwiązaniem otrzymanym na podstawie opracowanego w pracy modelu: wizualnego, za pomocą błędu R oraz zbadania uwarunkowania macierzy współczynników. Tak więc w rozdziale 6 uzyskano zadowalającą zbieżność wyników symulacji otrzymanych za pomocą numerycznego modelu obliczeniowego opracowanego przez autora pracy z wynikami ścisłymi dla tych samych przykładów obliczeniowych. Wyszło więc słuszny wniosek, że opracowany algorytm jest wystarczająco dokładny do analizy jednowymiarowego nieustalonego przewodzenia ciepła wraz z przemianą fazową.

W kolejnym rozdziale 7 autor porównał wyniki przeprowadzonych symulacji zjawiska przewodzenia ciepła z przemianą fazową w rzeczywistym oszkleniu z wynikami pomiarów tego oszklenia. Przedmiotem analizy było trzyszybowe oszklenie, w którym jedna przestrzeń międzyszybowa wypełniona była argonem, druga zaś MFZ firmy Rubitherm, w którym przemiana fazowa zachodziła w temperaturach około $17,5^{\circ}\text{C} \div 18,5^{\circ}\text{C}$. Wykonano dwa typy eksperymentów na Politechnice Łódzkiej. Jeden w prototypowej komorze kalorymetrycznej, drugi in situ poprzez wbudowanie oszklenia w rzeczywiste okno w budynku. Pomiary w komorze kalorymetrycznej odbywały się w sposób stacjonarny. Porównano wyniki pomiarów z wynikami symulacji dla wybranych kilku kroków czasowych od 1 min do 30 min oraz dla odległości pomiędzy kolejnymi węzłami w warstwie MFZ równej 1 mm oraz 6 mm. W tej części porównań otrzymano dość dobrą zbieżność wyników symulacji z wynikami pomiarów. W drugim eksperymencie przeprowadzonym in situ w przegrodzie zewnętrznej budynku (oknie) konieczne było w algorytmie numerycznym uwzględnienie promieniowania słonecznego padającego na badaną przegrodę. Do tego celu w algorytmie wykorzystano Net Radiation Method, czyli metodę bilansowania promieniowania. Uważam, że ta metoda nie jest bardzo skomplikowana i pozwala w skuteczny sposób odwzorować w obliczeniach promieniowanie słoneczne wraz z przemieszczaniem się frontu przemiany fazowej, zaś jej wybór uważam za trafny. W rozdziale 7 autor rozprawy w jasny sposób wytłumaczył założenia tej metody, ale z jakichś powodów opis metody umieścił w rozdziale 7.3 - Eksperyment - przegroda zainstalowana w elewacji budynku. Moim zdaniem ta część rozważań teoretycznych dotyczących opracowanego modelu numerycznego i wprowadzenia do niego dodatkowych równań uwzględniających promieniowanie w przegrodzie powinna być ujęta w osobnym rozdziale. Wreszcie na końcu rozdziału 7 autor porównuje wyniki symulacji numerycznych z wynikami pomiarów in situ w oknie w budynku. Uzyskano dość dobrą

zbieżność wyników symulacji z wynikami pomiarów dla wybranego dnia bezchmurnego oraz nieco gorszą zbieżność dla dnia ze zmiennym zachmurzeniem. Uważam, że przy modelowaniu numerycznym w autorskich algorytmach, gdzie stosuje się szereg uproszczeń, bardzo trudno jest dokładnie odwzorować dynamikę zmian wielkości wyznaczanych, zaś zaprezentowane wyniki obliczeń i pomiarów uważam za zadowalająco zgodne przy tak opracowanym algorytmie. Szkoda, że autor w tej części analizy nie zastosował jakiegokolwiek prostej metody statystycznej porównującej dwie grupy wyników: obliczenia i pomiary. Można byłoby na przykład obliczyć średni względny błąd procentowy czy pierwiastek ze średniego kwadratowego odchylenia. Należy dodać, że w rozdziale 7 została potwierdzona pierwsza teza pracy, czyli że jest możliwe opracowanie algorytmu numerycznego, pozwalającego w jednowymiarowych obliczeniach uwzględnić nieustalone przewodzenie ciepła wraz z przemianą fazową w przegrodzie płaskiej wielowarstwowej.

Po wykazaniu użyteczności opracowanego algorytmu w przedostatnim rozdziale 8 wykonano obliczeniową analizę zastosowania oszklenia trzyszybowego z warstwą MFZ w polskich warunkach klimatycznych. Analizowano zarówno sezon grzewczy jak i chłodniczy. Wzięto pod uwagę cztery rodzaje MFZ ze zmianą fazy w okolicy temperatury 5°C, 10°C, 18°C oraz 25°C, zarówno z położeniem warstwy MFZ po cieplej stronie oszklenia jak i po zimnej. Wreszcie w obliczeniach uwzględniono różne grubości warstwy z MFZ w oszkleniu: 5 mm, 10 mm, 15 mm oraz 20 mm. Jako punkt odniesienia przyjęto okno trzyszybowe bez MFC. Poszukiwano więc takiego przypadku, przy którym zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania oraz do chłodzenia dla okna z MFC będzie mniejsze niż dla okna bez MFC. Moim zdaniem takie odniesienie nie jest słuszne. Zgodnie z definicją okna podaną w normie PN-EN 12519:2007 „Okna i drzwi – Terminologia”: *Okno to element budowlany przeznaczony do zamykania otworu w ścianie lub pochylonym dachu. Umożliwia ono dopływ światła do pomieszczenia i gwarantuje wentylację*. Skoro okno ma umożliwiać dopływ światła, to powinny być porównywane rozwiązania o podobnym dopływie światła do pomieszczenia, o podobnej przezierności. Nie jest łatwe znalezienie okna o podobnej przezierności, ale można byłoby porównać wyniki symulacji z wynikami dla okna z zasuniętą roletą lub żaluzją albo dla pustaka szklanego o średniej przezierności podobnej jak dla okna MFC. Okno ze stałym, wysokim współczynnikiem przepuszczania światła widzialnego nie jest prawidłowym merytorycznym punktem odniesienia, bo ma inne parametry. Autor wprawdzie w tym rozdziale potwierdził drugą tezę pracy, że trzyszybowe okno z MFZ odpowiednio dobranym do sytuacji (kierunku światła, lokalizacji budynku) może poprawić efektywność energetyczną okna o około 10% w porównaniu do okna trzyszybowego bez MFZ. Należałoby jednak podkreślić, że nie jest możliwe zastosowanie takiego rozwiązania - okna z MFZ w oszkleniu w budynkach mieszkalnych czy użyteczności publicznej. Przyczyną jest aspekt psychologiczny - nikt nie chce okna, przez które przez większą część roku nie widać otoczenia za oknem. Takie rozwiązanie ma niszowe zastosowanie na przykład w budynkach produkcyjnych, magazynowych czy gospodarczych, gdzie w pionowej wysokiej ścianie zazwyczaj hali znajdują się wysoko nad posadzką doświetla. Dodatkowo w takich sytuacjach montaż żaluzji zewnętrznych jest utrudniony, więc takim przypadku okno z MFZ mogłoby być uzasadnione do zastosowania. Autor w pracy nie obliczył niestety dla każdego wariantu analizy ilości godzin w roku, w których przez okno widać świat zewnętrzny, a taka informacja byłaby bardzo przydatna. Wreszcie kończąc podsumowanie rozdziału 8 autor nazwał wykonaną analizę analizą wielokryterialną, ponieważ brał pod uwagę kryteria: zapotrzebowania na energię użytkową, zapotrzebowania na energię końcową, emisji CO₂ oraz kosztów energii. Moim zdaniem nie jest to analiza wielokryterialna, ponieważ jeśli budynek ma małe zapotrzebowanie na energię użytkową, to przy przyjętym źródle energii w budynku ma małe zapotrzebowanie na energię końcową. Tym samym ma małe koszty ogrzewania/chłodzenia oraz emituje mało CO₂ do atmosfery. Tak więc przy niskiej wartości jednego z kryteriów pozostałe kryteria mają też niskie wartości. W analizie wielokryterialnej kryteria powinny być różnorodne. Można w tym przypadku mówić o analizie pod kątem kilku kryteriów, ale one są ze sobą związane.

Uważam, że przedstawiony układ rozdziałów w pracy jest czytelny a praca ma logiczny układ. Jest napisana rzeczowo i w sposób zrozumiały. Język w pracy jest poprawny, znalazłam nieliczne błędy edytorskie oraz sporo błędów interpunkcyjnych w zdaniach złożonych. Praca zawiera wszystkie wymagane elementy rozprawy doktorskiej, ma charakter naukowo-badawczy z naciskiem na część analityczną a także aplikacyjny.

2. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

W rozprawie zaprezentowano oryginalny opracowany przez doktoranta zmodyfikowany model nieustalonego jednowymiarowego przewodzenia ciepła przez jednowarstwową przegrodę płaską z uwzględnieniem promieniowania słonecznego odbijanego oraz przechodzącego przez poszczególne warstwy przegrody przy uwzględnieniu występowania materiału zmieniającego stan skupienia w jednej z warstw przegrody. Opracowanie takiego algorytmu wymagało niewątpliwie znacznego nakładu pracy oraz zdobycia wiedzy z kilku różnych dziedzin i stanowi oryginalne i twórcze osiągnięcie doktoranta. Poniższe uwagi, mające w dużej mierze charakter komentarzy bądź sugestii, nie umniejszają mojej pozytywnej oceny rozprawy doktorskiej i w znacznej mierze mają charakter porządkowy, formalny bądź dyskusyjny.

1. W spisie głównych symboli brakuje w wielu wielkościach jednostek przy objaśnieniach symboli, np.: ciepło utajone, czas, temperatura czy objętość.
2. Stosowane są w pracy skróty myślowe czy uproszczenia w nomenklaturze niepoprawne w pracach naukowych. Na przykład Q_v nazwano wewnętrznym źródłem ciepła [W/m^3], przy czym powinno być: jednostkowy strumień ciepła oddawany przez objętościowe wewnętrzne źródło ciepła.
3. W rozdziale 5.2 podano algorytm obliczeniowy. Wzory (5) i (6) podają entalpię właściwą oraz dyfuzyjność cieplną. Po wstawieniu ich do wzoru (4) otrzymuje się wzór (7), w którym po lewej stronie wzoru pojawiła się gęstość. Jeżeli pomnożono równanie obustronnie przez gęstość, to dlaczego gęstość nie występuje po prawej stronie?
4. W rozdziale 5.2 równanie (14) pogrupowano otrzymując równanie (15). Autor przyjął n -ty węzeł oraz i -ty krok czasowy. Moim zdaniem w równaniu (14) w mianowniku powinno być więc „ $l_{n:n+1}$ ” oraz „ $l_{n-1:n}$ ”, tak jak podano w równaniu (15).
5. W rozdziale 6.1.1 w równaniu (31) powinno być „ $\Delta t^2/2$ ” a nie „ $\Delta t/2$ ” w trzecim składniku równania.
6. W rozdziale 6.1.1 w równaniu (35) przed drugim ułamkiem powinna być jeszcze dyfuzyjność cieplna pomnożona przez ten ułamek.
7. Rozdział 6.1.2 - rysunek 9. Uważam, że zamiast kroku czasowego „ j ” oraz „ $j-1$ ” powinno być „ i ” oraz „ $i-1$ ”, ponieważ takie oznaczenia przyjmowano we wzorach.
8. W rozdziale 7.2 w sposób bardzo lakoniczny podano opis stanowiska badawczego. Nie podano: wymiarów komory; wymiarów badanej próbki; w jaki sposób sterowano temperaturą powietrza w komorze, aby uzyskać jej stabilność; jaki zastosowano czujnik gęstości strumienia ciepła; jaka jest jego wielkość; jakie zastosowano czujniki temperatury; z jakim krokiem czasowym odbywały się pomiary; po której stronie w oszkleniu znajdowała się warstwa z MFZ. Brak jest również analizy niepewności pomiarowych. To samo dotyczy rozdziału 7.3 i pomiarów in situ na elewacji w budynku.
9. Rozdział 7.2.1.1 - rysunki od 32 do 41. Wygląda na to, że wraz ze zmianą kroku czasowego w obliczeniach (wykresy czerwone) zmieniany był również krok czasowy w pomiarach (wykresy niebieskie). Moim zdaniem powinno się porównywać różne kroki czasowe w symulacjach z jedną linią wyników pomiarów. Wtedy widać które symulacje dają najlepsze przybliżenie.
10. W równaniach (63) - (65) w rozdziale 7.3 występuje wielkość „ ρ ”, która w spisie symboli jest oznaczona jako gęstość, nie zaś jako refleksyjność. Co więcej, refleksyjnością nazwano z kolei wielkość „ R_o ”, którą we wzorze (67) przyrównano do „ J_1 ” i oznaczono na rysunku 54 jako promieniowanie rozchodzące się od płaszczyzny. Wielkość „ $R_o=J_1$ ” we wzorze (67) składa się z samych wielkości bezwymiarowych. Prędzej nazwałabym ją udziałem energii odbitej z danej powierzchni w całkowitej energii promieniowania padającego na daną powierzchnię, ponieważ refleksyjność „ ρ ” oraz transmisyjność „ τ ” występują już w tym wzorze. Te oznaczenia należałoby doprecyzować, bo skróty myślowe doprowadzają do mylących sytuacji.
11. Rozdział 7.3.1. Nie rozumiem po co we wzorach (71) do (73) w funkcjach trygonometrycznych zastosowano nawiasy okrągłe z pojedynczych wielkości.
12. Wzory (83) i (93) są tożsame, ale raz występuje „ l ” a raz „ d ” - należałoby to ujednotlić.
13. Rozdział 8.2 - dlaczego wprowadzono nową nazwę energii finalnej, skoro w Polsce chyba od roku 2009 występuje energia końcowa. Taka nazwa została wprowadzona rozporządzeniem o charakterystyce energetycznej budynku i nie potrzeba jej zmieniać.

14. Rozdział 8.2.1 - we wzorze (97) nie zgadza się jednostka „ $E_{U SG}$ ” z „ q ”, które jest wyrażone w W/m^2 . Brak jest tego w spisie oznaczeń, ale w tekście podano, że „ $E_{U SG}$ ” są zyskami ciepła. Jako energia powinny być wyrażone w J lub kWh. Wtedy we wzorach (97) i (99) chyba należałoby jeszcze wstawić długość kroku czasowego. Albo wszystkie wielkości są wyrażone w W/m^2 i nazywamy je wtedy gęstością powierzchniową strumienia ciepła a nie zyskami ciepła. Znowu pojawia się brak precyzji nazywania wielkości fizycznych, który w pracach naukowych nie powinien występować.
15. Rozdziały 8.3 - 8.5 - proszę o wyjaśnienie dlaczego w analizie energii końcowej, emisji CO_2 oraz kosztów energii pominięto energię pomocniczą do celów ogrzewania i chłodzenia.

Pragnę podkreślić, że powyżej zawarte uwagi nie wpływają na moją pozytywną ocenę pracy i mają w dużej mierze charakter sugestii, które pozwoliłam sobie wypunktować mając na uwadze potencjalne wykorzystanie materiału zawartego w rozprawie w przyszłych publikacjach Doktoranta.

3. Uwagi końcowe

Praca jest starannie zredagowana, stosowana jest poprawna nomenklatura naukowa. Zwraca uwagę wyczerpujący opis opracowanych przez Doktoranta modeli numerycznych pozwalający na szczegółowe przeanalizowanie materiału będącego głównym przedmiotem pracy. Podane uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny bądź porządkowy i mam nadzieję, że będą traktowane raczej jako pomoc w zakresie dalszego wykorzystania prac badawczych. Uwagi te nie pomniejszają wartości merytorycznej opiniowanej rozprawy.

4. Wniosek do Rady Naukowej dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest oryginalnym osiągnięciem naukowym Doktoranta, wnosi wkład poznawczy oraz metodyczny pracą naukową. Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu właściwych metod. W moim przekonaniu przedstawiona do recenzji rozprawa jednoznacznie spełnia zwyczajowe ramy stawiane pracom doktorskim. Co więcej, posiada walory aplikacyjne, gdyż opracowany przez Autora model obliczeniowy może służyć do wykonywania symulacji numerycznych w wielu skomplikowanych przegrodach budowlanych (nie tylko oszkleniach), z oraz bez wbudowanego materiału zmieniającego fazę. Doktorant opanował warsztat pracy badawczej w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych. Zaprezentowana w rozprawie analiza stanowi rozwiązanie zadania naukowego i w moim przekonaniu spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że:

1. Rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Krzysztofa Kułakowskiego nt.: *Modelowanie i analiza procesów wymiany ciepła w oszkleniu wypełnionym materiałem fazowo-zmiennym* spełnia wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018, poz. 1668 z późn. zmianami i aktami powiązanymi) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.
2. Zakres rozważań rozprawy kwalifikuje ją do dyscypliny naukowej: inżynieria lądowa i transport.

Agnieszka Lechowska