Łódź, 23 sierpnia 2019

Dr hab. inż. Piotr Ostrowski
Katedra Mechaniki Konstrukcji
Politechnika Łódzka
Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska
Al. Politechniki 6
90-924 Łódź

Recenzja rozprawy doktorskiej

Autor: mgr inż. Łukasz Wodzyński
Tytuł pracy: Przenoszenie fluktuacji termicznych przez przegrodę budowlaną utworzoną z periodycznego materiału kompozytowego
Miejsce: Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Warszawa 2019.
Promotor: dr hab. Ewaryst Wierzbicki, prof. SGGW
Promotor pomocniczy: dr Dorota Kula

Na zlecenie Rady Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie z dnia 24 lipca 2019r.

1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska napisana jest w języku polskim i zawiera 96 stron tekstu podstawowego, podzielonego na pięć rozdziałów i bibliografię. Spis literatury zawiera 154 pozycji bibliograficznych zestawionych w kolejności alfabetycznej.

Rozdział pierwszy pracy poświęcony jest ogólnemu opisowi rozważanego zagadnienia. Wymienione są tu główne cele, motywacja jak i zakres pracy. Autor zaznajamia nas z częścią użytych w pracy oznaczeń, a także dokonuje gruntownego przeglądu literatury.

W rozdziale drugim przedstawiono matematyczny opis struktury periodycznego kompozytu oraz podstawowe założenia modelowe, które będą w pracy wykorzystywane tj. rozszerzoną hipotezę mikro-makro. Zaproponowana hipoteza mikro-makro polega na rozbiciu pola temperatury na część regularną i część rezydualną. Pierwsza z nich przedstawiona jest w postaci nieskończonego szeregu Fouriera, w którym bazę stanowią z góry znane funkcje ϕ^p. Druga część (rezydualna) zaczerpnięta jest z techniki tolerancyjnej aproksymacji i przedstawiona jest w postaci skończonego szeregu, w którym poszukiwane funkcje są z założenia wolnozmienne. Hipoteza mikro-makro, w połączeniu z metodą ortogonalizacji równań doprowadziła Autora do ogólnych uśrednionych równań modelu, w którym nieznane są wielkości temperatury uśrednionej, amplitudy Fouriera a_p i amplitudy tolerancyjne ψ_A. W dalszej części rozdziału przedstawiono sposób na redukcję amplitud tolerancyjnych i Fouriera, dzięki czemu dla przypadku szczególnego, otrzymano równania efektywnego przewodnictwa cieplnego. Jednorodna część równania na amplitudy Fouriera a_p posłużyła tu za punkt wyjścia do badania zjawiska efektu brzegowego w rozważanym kompozycie. Doktorant odniósł się w tym rozdziale również do samej postaci dekompozycji pola temperatury, tzn. do formalnej reprezentacji rezydualnej i regularnej części pola temperatury. Przedstawione tu konstrukcje oraz sama postać regularnej części pola temperatury są niewątpliwie nowatorskie i oryginalnymi częściami pracy.

Rozdział trzeci pracy poświęcony jest transportowi fluktuacji termicznych przez kompozyt. Rozważono tu dwa przypadki periodycznego impulsu termicznego: parzystego i nieparzystego. Każdy z nich prowadzi do innego równania efektu brzegowego.

W rozdziale czwartym Autor zawarł przykłady numeryczne obrazujące wpływ takich parametrów jak stosunek współczynników przewodzenia ciepła poszczególnych składników k oraz funkcja stosunku nasycenia η na wartość intensywności wykładniczej ω_{exp} i rotacyjnej ω_{rot}. Wielkości te związane są ściśle z szybkością tłumienia fluktuacji temperatury, czyli z efektem brzegowym. Podane są tu jawne wzory analityczne na współczynniki równań i rozwiązania. W szeregu różnych przypadków Autor wykazuje, że wpływ wielkości mikrostruktury na ω_{exp}, ω_{rot} jest niewielki, natomiast ich wielkości ekstremalne osiągane są „w otoczeniu" jednorodności materiałowej ($k = 1$).

Rozdział piąty poświęcony jest uwagom i wnioskom końcowym. Należy podkreślić, że wymienione wnioski są wypunktowane w sposób przejrzysty, co jest niewątpliwym atutem pracy.

Struktura pracy jest ogólnie poprawna, choć pod względem redakcyjnym mocno zaniedbana, o czym mowa jest poniżej. Sama praca napisana jest dobrym językiem naukowo-technicznym, co pozwala stwierdzić, że Autor rozprawy posiada umiejętności pisania prac o charakterze naukowym.

2. Podsumowanie, komentarze i uwagi

Problematyka pracy podjęta przez Doktoranta jest bardzo na czasie ale i stosunkowo trudna. Wymaga ona bowiem biegłego posługiwania się aparatem matematycznym i informatycznym, nie tracąc przy tym tak zwanej intuicji inżynierskiej. Celem pracy było uzyskanie odpowiedzi na pytanie od jakich parametrów zależy intensywność tłumienia oscylacji temperatury przenoszonych przez kompozyt i kiedy to tłumienie jest największe. Przed podjęciem badań została zatem postawiona hipoteza, że istnieje pewna krzywa $k = k(\eta)$, wzdłuż której intensywność wykładnicza i rotacyjna osiąga ekstremum lokalne. Zdaniem Recenzenta cel został przez Doktoranta osiągnięty, a hipoteza sprawdzona, co znalazło swoje potwierdzenie w rozdziałach czwartym i piątym pracy. Uzyskane wyniki pracy mogą przysłużyć się do projektowania przegród termicznych o żądanym rozkładzie temperatury. Cała analiza intensywności przenoszenia fluktuacji brzegowych przez kompozyt jest niewątpliwie oryginalnym elementem pracy. Bibliografia pracy jest dość obszerna ale moim zdaniem adekwatna do tematyki pracy.

Do oryginalnych elementów pracy Autora z całą pewnością zaliczyłbym

- Postać mikro-makro dekompozycji, w której jedna część rozwinięta jest w szereg Fouriera.
- Otrzymanie na drodze pewnych przejść asymptotycznych uśrednionych równań opisujących przepływ ciepła w analizowanych strukturach ale i dających możliwość badania zjawiska efektu brzegowego.
- Nadanie odpowiedniej interpretacji fizycznej wartościom własnym (a w zasadzie ich częściom rzeczywistym i urojonym) pewnego operatora różniczkowego.
- Znalezienie rozwiązania algebraicznego równania dla amplitud Fouriera.
- Postawienie hipotezy istnienia ekstremum lokalnego funkcji $k(\eta)$.
- Przykłady obliczeniowe, analiza i wnioski.

Choć sama praca jest bardzo ciekawa, niestety nie jest wolna od wad i błędów. Swoje uwagi podzieliłem na trzy części: uwagi ogólne, które nie wymagają komentarza czy odpowiedzi; uwagi szczegółowe oraz pytania otwarte.

2.1. Uwagi ogólne (do wiadomości Autora)

(a) Tekst pracy nie jest poprawnie sformatowany. Rozmiar czcionki jest niejednolity, równania nie są wyśrodkowane, a część z nich jest niepotrzebnie powielona. Dla przykładu, równanie (2.20) jest tożsame z (2.48). Pozycja numeracji równań jest również różnoraka.
(b) Zwyczajowo, w celu podkreślenia z jakimi obiektami mamy do czynienia, wielkości macierzowe zapisuje się nieco inaczej niż wielkości skalarne. Zazwyczaj poprzez symbole pogrubione. Doktorant konwencję tę stosuje (por. (1.1)) bądź nie. Brak tu pewnej konsekwencji.
(c) W pracy pojawiają się symbole, które nie zostały nigdzie objaśnione. Należy się niestety domyślać ich znaczenia. Niektóre symbole znaczą co innego w zależności od sytuacji.
(d) W przeglądzie literatury zabrakło odniesień do metody RVE, która również jest szeroko stosowana przy modelowaniu zagadnień fizycznych w kompozytach.
(e) Zdaniem Recenzenta, wszystkie przekształcenia matematyczne oraz wyprowadzenia równań modelu można pominąć, jeśli można je „w mgnieniu oka" odnaleźć w innych, cytowanych przez Autora publikacjach. Pozycje, do których się Doktorant w takich sytuacjach odwołuje nie są łatwo osiągalne (monografie), co czyni recenzję tej pracy dość dużym wyzwaniem, nawet dla osoby zaznajomioną z techniką tolerancyjnej aproksymacji. Zatem pominięcie kluczowych elementów wyprowadzenia nie jest moim zdaniem poprawnym krokiem, praca zyskałaby dodatkowy walor gdyby takowe się zachowało.
(f) W pracy zabrakło wielu objaśnień graficznych. W kilku miejscach przydałaby się jakaś ilustracja, rysunek by móc lepiej i szybciej zinterpretować treść rozważań.
(g) W kilku miejscach pracy, szczególnie w równaniach, wkradły się angielskie słowa.
(h) Dla niektórych przykładów obliczeniowych, jak Autor twierdzi, wymagane było użycie metod numerycznych podobnych do metody różnic skończonych. Szkoda, że nie zostało zawartych w pracy więcej szczegółów odnośnie zastosowanej metody i gęstości użytej siatki. Nie wiadomo przez to czy i dlaczego wykresy intensywności wykładniczej charakteryzują się nieciągłością (pierwszego rodzaju na moje oko). Szkoda również, że nie podkreślono, które z załączonych wykresów są dyskretne (punktowe), a które nie.

2.2. Uwagi szczegółowe

(a) Strona 12: w punkcie 8) wprowadzono definicję „kompozytu $\mathbf{p}_k$-periodycznego". Ze względu na zapis poniżej, prawdopodobnie chodzi o „kompozyt $\mathbf{v}_k$-periodyczny" albo „k-periodyczny".
(b) Prawa strona równania (1.3) jest całką po obszarze $x + \Delta$, a linijkę wyżej jest mowa o $\Delta(z) \equiv z + \Delta$. Czy jest jakaś wyraźna różnica pomiędzy zmienną x a z? W akapicie poniżej (1.3) mowa jest o zmiennej y, która jest odpowiedzialna za kierunek periodyczności, ale o tym czytelnik dowiaduje się z kontekstu dopiero kilka rozdziałów dalej.
(c) Strona 23: wprowadzono tu pojęcia operatorów różniczkowych ∇_σ oraz $\nabla_{D-\sigma}$, które nigdzie nie występują. Autor w całej pracy stosuje zapis ∇, ∇_y lub ∇_z. Niemniej, zamiast σ powinno być d, a opisy gradientów powinny być poprawione: ∇_σ ma zera na ostatnich $D - d$ pozycjach, nie pierwszych.
(d) Strona 23: zdanie „(...) Pola $K = K(\cdot)$ i $c = c(\cdot)$ nie zależą od pola temperatury θ oraz stanowią ograniczenie dla obszaru Ω_d pewnych periodycznych pól (...)" jest dla Recenzenta niezrozumiałe. Wielkości $K = K(\cdot)$ i $c = c(\cdot)$ są funkcjami, a obszar Ω_d od nich nie zależy.
(e) Strona 23: sformułowanie „(...) Oznacza to, że istnieje d-wyrazowy ciąg $(\mathbf{v}^1, \dots, \mathbf{v}^d)$ niezależnych wektorów (...)" jest moim zdaniem niewystarczający. Wymagamy tu raczej by wektory $(\mathbf{v}^1, \dots, \mathbf{v}^d)$ były przynajmniej liniowo-niezależne.

(f) Strona 23: w równaniu (2.5) podana jest jeszcze inna definicja operatora uśredniania niż w (1.3). Uwagę Recenzenta zwróciło również zdanie tuż nad (2.5), tzn. „Istotną rolę...", w którym pojawia się zapis $z = z(z, y)$. Być może powinno być $f = f(z, y)$, ale jeśli tak, to jak się mają zmienne z, y do x?

(g) Strona 24: równania (2.6) oraz (2.9) przedstawiają, jak rozumiem, równoważną dekompozycję pola temperatury. Część rezydualna θ_{res} odpowiada jakby części długofalowej θ_L, co Autor sugeruje komentarzem do (2.32) ze strony 30. Z drugiej strony, warunek $(2.43)_2$ w połączeniu z (2.8) sugeruje, że to część regularna θ_{reg} odpowiada części długofalowej θ_L. Brak jednoznacznego przekazu.

(h) W równaniu (2.12) znajdujemy pośrednio zapis $u(y, z, t) = \lim_{\varepsilon \to 0} \vartheta(y, z, t)$, ale funkcja tolerancyjnie uśrednionego pola temperatury ϑ nie zależy od ε. Przeto przejście graniczne niczego nie zmienia i jest moim zdaniem zbyteczne. Rozumiem, że z wolnozmienności ϑ otrzymujemy $\vartheta = \langle \vartheta \rangle$, a stąd (2.15)?

(i) Równania (2.18)-(2.20) zostały otrzymane w drodze ortogonalizacji równań. Autor jednak nie wspomniał do jakich własności operatora uśredniania się odniósł, a przecież te zależeć będą od definicji funkcji wolnozmiennej, tolerancyjnie periodycznej itd. Brak podanych założeń skutkuje tym, że nie wiadomo dlaczego w (2.19) pominięto składniki z pochodną czasową. Ponadto, w równaniach (2.18)-(2.20) pojawiają się dodatkowe oznaczenia, np. $\psi_\omega^{(y)}$ oraz $\psi_\omega^{(z)}$. Czy chodzi tu o amplitudy oscylacji temperatury, zależne odpowiednio od współrzędnej y oraz z? Jeśli tak, to $\psi_\omega^{(y)}$ nie można w łatwy sposób wyeliminować z (2.18) jak ma to miejsce w rozdziale 2.2. Podejrzewam zatem, że gdzieś tu się wkradł błąd redakcyjny.

(j) Równania (2.21) są mylące. Sugerują one bowiem, że w równaniach (2.19)-(2.20), chociażby w miejscu $L_g[u]$, nie występują gradienty funkcji u. Proponowałbym zdecydować się na jedną z opcji zapisu, np. na tę z gradientem $L_g[\nabla_z u]$, gdyż częściej ona w tekście występuje. Analogicznie, powinno być $L_a^\lambda[\nabla_z u]$ zamiast $L_a^\lambda[u]$.

(k) W równaniu (2.23) pojawia się operator, który do tej pory nie był przedstawiany, tj. $\langle \cdot, \cdot \rangle$. Co on tu oznacza? Parę dualną czy też chodziło o $\left[\langle k\, \nabla_y^T g_{(y)}^\nu \rangle, \langle k\, \nabla_y^T g_{(z)}^\mu \rangle\right]$? Ponadto, nad (2.23) czytamy „Istotnie oznaczając przez H kwadratową macierz...". Brzmi to jak definicja współczynników macierzy, zgoła odmiennych od tych z (2.22). Brak jednoznaczności.

(l) W równaniu $(2.24)_2$ symbol k jest poza uśrednieniem. Czy jest to celowy zabieg, czy może k oznacza tutaj stosunek współczynników przewodzenia ciepła?

(m) Strona 28: zdanie „Bez uwzględnienia efektu skali ma ono postać... otrzymaną z (2.23) w przypadku asymptotycznym..." zdaje się sugerować tylko jedną postać równania $(2.23)_1$, podczas gdy w pracy widnieje $(2.27)_1$ oraz (2.26). Czy są one tożsame ale wyrażone jedynie przy innych oznaczeniach? Ponadto, $(2.27)_1$ lub (2.26) nie może w łatwy sposób wynikać z (2.23), gdyż $\dot{u}$ jest tam pod znakiem uśrednienia. Operacja wyciągnięcia funkcji poza znak uśrednienia jest prostsza aniżeli wciągnięcia pod.

(n) Strona 28: podany w tekście operator $L_a^0[\nabla_z u]$ nie może być granicą $L_a^\lambda[\nabla_z u]$ przy $\lambda \to 0$, gdyż postać (2.21) temu przeczy.

(o) W równaniu (2.29) jest błąd w składniku $\lambda \langle \phi^p b \rangle$. Myślę, że powinno być $\lambda \langle \varphi^p b \rangle$. Ponadto, obecność w tym wzorze składnika $\frac{d\varphi^p}{dz} k_{zz}$ nie wynika z (2.21). W równaniu $(2.30)_2$ oraz (2.31) pomieszane są wskaźniki martwe.

(p) Co oznacza operator $\langle \cdot \rangle_{\partial\Delta_A \cap \partial\Delta_B}$ w (2.33)? Czy jest to modyfikacja operatora uśredniania (1.3) zastosowana do zbioru $\partial\Delta_A \cap \partial\Delta_B$ zamiast $x + \Delta$? Brak w tekście jakichkolwiek wyjaśnień na ten temat.

(q) W równaniu (2.35) druga i czwarta linijka dotyczy jednej i tej samej funkcji. Błąd powielania.

(r) Strona 31: zdanie „Dla każdego kompozytu periodycznego istnieje rozkład komórek..." w hipotezie rozkładu komórek jest nie do końca prawdziwe. Amplitudy tolerancyjne mogą zależeć od zmiennej y (np. zagadnienie niestacjonarnego przepływu ciepła, wzdłuż osi y).
(s) Równanie (2.44) przedstawia formuły na gradienty funkcji θ_L^ε. Czy jest to funkcja z (2.42)? Jeśli tak, to (2.44) jest niepoprawne. Nie jest też jasne w jaki sposób (2.45) miałoby wynikać z (2.43).
(t) Strona 34: „Zauważmy, że $\langle \varphi^p \nabla_z^T (k\nabla u)\rangle = 0$ jeśli $\frac{\partial \varphi^p}{\partial z} = 0$". Bez dodatkowych założeń o φ^p bądź mikrostruktury kompozytu zdanie to jest fałszywe. Istotnie, mamy $\langle \varphi^p \nabla_z^T (k\nabla u)\rangle = \langle \nabla_z^T (\varphi^p k \nabla u)\rangle - \langle \nabla_z^T \varphi^p (k\nabla u)\rangle$.
(u) Na początku rozdziału 3.2 wprowadzono pojęcie parzystej funkcji $j = j(\xi)$ zmiennej rzeczywistej. Sam tytuł rozdziału mówi jednak o impulsach nieparzystych.
(v) Funkcja $v(\xi)$ w równaniu (3.6) jest nieciągła w zerze. Czy taki był zamysł Autora?
(w) Równanie (3.7) przedstawia jawną formułę na pochodną φ względem z. Czy przypadkiem nie powinna to być funkcja ϕ? Niejasny też jest sposób otrzymania formuły końcowej (3.7), gdzie pojawia się pochodna φ względem y. Z tego co do tej pory zrozumiałem, zmienne y oraz z są od siebie całkowicie niezależne. W równaniu pojawiają się również pochodne funkcji φ oraz η. Względem jakich zmiennych są to pochodne?
(x) Strona 49: w zdaniu „Ostatnie z równań odpowiada za spełnienie..." znajdujemy informację o warunku na ciągłość strumienia ciepła. Dwa zdania dalej czytamy „Stąd w dalszych rozważaniach trzecie z równań (4.8) nie będzie uwzględniane". Czy to oznacza, że otrzymane rozwiązania nie zapewniają ciągłości strumienia ciepła? Wydaje mi się, że nie o to chodziło tu Autorowi. Ponadto, równania (4.8) zawierają niewiadomą ψ_A, przy czym (4.7) jej nie uwzględnia.
(y) Strona 53: „Jeżeli natomiast w równaniu (4.36) wyrażenie pod pierwiastkiem... wówczas wzór (4.36) wyraża dwie sprzężone liczby urojone, z których dodatnia jest intensywnością...". Dla liczb zespolonych nie wprowadza się zazwyczaj relacji mniejszości, stąd ciężko mówić o tym, która z liczb jest mniejsza, większa, dodatnia czy ujemna. Możemy natomiast coś bliżej powiedzieć o np. częściach urojonych i o to zapewne chodziło tu Autorowi.

2.1. Pytania otwarte

(a) Warunek (2.8) wydaje się być z pozoru sztuczny. Czy kryje się za nim jakaś szczególna interpretacja fizyczna? Umieszczenie w pracy uzasadnienia nałożenia takiego warunku na θ_{reg} byłoby na pewno z korzyścią dla czytelnika.
(b) Równania (2.18)-(2.20) zostały otrzymane na drodze ortogonalizacji równania przewodnictwa cieplnego (1.2) względem dekompozycji pola temperatury (2.14). Równanie (2.19) na amplitudy tolerancyjne, jako jedyne, nie zawiera pochodnych czasowych. W pracy jednak nie skomentowano w żaden sposób tego dość rygorystycznego założenia, a wydaje się ono co najmniej interesujące.
(c) Strona 32: Autor pisze, że amplitudy $\psi_\omega^{(y)}$ oraz $\psi_\omega^{(y)}$ nie są różniczkowalne na powierzchni Γ. Pytanie zatem, czy i jak mają się te funkcje do tych z tolerancyjnego modelowania, gdzie były one różniczkowalne w obszarze całego kompozytu?
(d) Moim zdaniem za mało jest informacji o warunkach brzegowo-początkowych dla zadań z rozdziału czwartego. Na stronie 46 czytamy, że „Pole temperatury θ wewnątrz obszaru zajmowanego przez kompozyt jest powodowane przez dwie stałe wartości temperatury: na zewnątrz i wewnątrz pomieszczenia (...)". Nie wiadomo niestety nic o warunkach na pozostałych powierzchniach brzegowych. Bez dodatkowych informacji zdanie to, w połączeniu z rysunkami 4.1 oraz 4.2, może sugerować, iż pozostałe powierzchnie są termicznie izolowane,

ale wówczas przepływ ciepła dla zagadnienia stacjonarnego jest jednokierunkowy (prostopadle do kierunku periodyczności) i fluktuacji żadnych nie ma.

(e) Wszystkie przykłady obliczeniowe zamieszczone w pracy wykonane są dla stacjonarnego przepływu ciepła. Niezmiernie interesujące byłoby pokazanie podobnej analizy dla wybranych chwil czasowych (zagadnienie niestacjonarne). Niewątpliwie wzbogaciłoby to pracę.

3. Wniosek końcowy

Przedstawione powyżej uwagi nie obniżają znacząco wartości merytorycznej recenzowanej rozprawy i z całą pewnością nie umniejszają osiągnięć Autora. Z uwagi na podjętą problematykę, poprawność otrzymanych wyników, odpowiednio wysoki poziom trudności ich otrzymania oraz niewątpliwą samodzielność w ich uzyskaniu stwierdzam, że Rozprawa **spełnia kryteria** określone w Art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Tym samym **wnoszę o dopuszczenie mgr. inż. Łukasza Wodzyńskiego do publicznej obrony.**

P. Ostrowski