

dr hab. inż. Paweł Purgał prof. PŚk  
Wydział Inżynierii Środowiska,  
Geomatyki i Energetyki  
Politechniki Świętokrzyskiej

## **RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

### **„Modelowanie procesów wymiany ciepła w wentylowanych warstwach przegród budowlanych”**

**Autorem pracy** jest mgr inż. Marianna Olenets. **Promotorem rozprawy** jest prof. dr hab. Jerzy Zbigniew Piotrowski. Przewód doktorski otwarty został na Wydziale Inżynierii Środowiska, Geomatyki i Energetyki Politechniki Świętokrzyskiej.

**Przedstawiona do recenzji praca** liczy 179 stron w tym 11 stron załącznika. Składa się z 5 rozdziałów poprzedzonych wprowadzeniem, 33 podrozdziałów, wniosków końcowych, bibliografii – 81 pozycji ( w tym 6 norm, 2 zgłoszenia patentowe, 5 adresów stron internetowych) – 15 w języku polskim i 54 w obcym, wykazu najważniejszych oznaczeń i skrótów oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. W pracy zamieszczono 25 tabel, 71 rysunek w tym 7 fotografii i 18 wykresów oraz 123 wzorów. W pracy nie podano zestawienia tabel, rysunków i wykresów.

Załącznik zawiera wyniki pomiarów temperatur powierzchni wewnętrznych wentylowanego strychu i powietrza w pobliżu tych powierzchni, prędkości powietrza w otworze wentylacyjnym, gęstości strumienia ciepła, temperatur powietrza wewnętrznego i zewnętrznego wykonanych w badanym obiekcie i jego pobliżu.

**Celem naukowym rozprawy doktorskiej** było:

1. Opracowanie modeli fizycznych i matematycznych procesów wymiany ciepła w przegrodach budowlanych z wentylowaną warstwą powietrzną, takich jak: fasada wentylowana, ściana do pasywnego ogrzewania słonecznego, wentylowane

strychy i stropodachy, pozwalających ocenić wpływ różnych czynników na procesy wymiany ciepła w okresie letnim i zimowym.

2. Opracowanie metody i algorytmu rozwiązywania modeli matematycznych oraz przeprowadzenie analizy porównawczej wyników obliczeń uzyskanych przy pomocy zaproponowanych modeli z wynikami obliczeń przedstawionych w uwzględnionych źródłach literaturowych.
3. Przeprowadzenie eksperymentu badawczego w celu weryfikacji opracowanych modeli w warunkach rzeczywistych.

**Celem praktycznym rozprawy** było opracowanie i przedstawienie zaleceń projektowych i wykonawczych dla przegród budowlanych z wentylowaną warstwą powietrzną prowadzących do zmniejszenia strat ciepła w okresie zimowym, dopływu ciepła w okresie letnim oraz strat energii na kształtowanie mikroklimatu pomieszczeń z elementami pasywnego ogrzewania słonecznego.

**Przedmiotem badań** i pomiarów eksperymentalnych była otwarta warstwa powietrzna na półprzełazowym strychu budynku A Politechniki Świętokrzyskiej gdzie przez 24 doby mierzono temperaturę, strumienie ciepła i prędkość ruchu powietrza w otworach. Eksperyment prowadzono tylko w jednej części strychu oddzielonej od ogólnej przestrzeni, z jednej strony czarną folią polietylenową a z drugiej pomieszczeniem maszynowni. Dla porównania wyników obliczeń otrzymanych za pomocą opracowanego modelu matematycznego z danymi eksperymentalnymi wybrano okres jednej godziny, w czasie której nie zauważono istotnych zmian temperatury, prędkości ruchu powietrza a także zmian kierunku wiatru, co dawało przybliżone warunki stacjonarnego procesu wymiany ciepła.

**Do wykonania pomiarów** w celu zmierzenia temperatury powietrza w warstwie powietrznej wykorzystano dwa termometry ośmiokanałowe B-711 i LB-711E z rejestratorami. Do pomiarów temperatur i gęstości strumieni cieplnych użyto wielofunkcyjne przyrządy Almemo 2890-9 z czujnikami temperatury i dwoma czujnikami do mierzenia gęstości strumieni cieplnych. Wyniki pomiarów zapisywano przez rejestratory wykorzystanych przyrządów co 20 minut.

**Poszczególne części rozprawy** dotyczą:

- we wprowadzeniu autorka przedstawia syntetycznie cele stosowania wentylowanych warstw powietrznych w budownictwie oraz wpływ konstrukcji i wykorzystania czynników klimatycznych w ich uzyskaniu, podkreślając znaczenie modelowania procesów

wymiany ciepła dla poprawności projektowania przegród budowlanych z wentylowaną warstwą powietrzną;

- rozdział pierwszy - został poświęcony omówieniu różnych rozwiązań przegród budowlanych z wentylowaną warstwą powietrzną wraz ze szczegółową analizą literaturową metod obliczania i prezentacją modeli matematycznych procesów ruchu powietrza i wymiany ciepła w otwartych warstwach przegród budowlanych. Autorka uważa, że klasyczna metoda przy obliczeniach cieplnych wentylowanych warstw powietrznych w poziomych i pionowych przegrodach budowlanych, oparta na sporządzeniu równania różniczkowego bilansu cieplnego powietrza dla nieskończenie małego wycinka  $dx$  i jego późniejsze całkowanie, nie jest wystarczająca dla prawidłowej oceny cieplnych właściwości konstrukcji i trudno na jej podstawie opracować prawidłowe zalecenia projektowe. Najwyżej ocenia modele opisane matematycznie układami równań bilansów cieplnych powierzchni i powietrza. Stanowią one dla autorki punkt odniesienia i wzorzec do porównania z opracowanymi przez siebie modelami i wnioskowania o ich poprawności i dokładniejszym odzwierciedleniu rzeczywistości. Nie zmienia to jednak krytycznej oceny przeanalizowanych modeli. Autorka stwierdza brak wystarczająco kompletnych modeli matematycznych oraz metod obliczania wymiany ciepła. Dotyczy to szczególnie elementów pasywnych systemów ogrzewania słonecznego budynków z zainstalowanymi w przestrzeni powietrznej urządzeniami regulującymi dopływ ciepła w wyniku promieniowania słonecznego. Rozdział kończą cele i założenia rozprawy, zdaniem autorki, uzupełniające zauważone braki i niedoskonałości modeli i metod podanych w analizowanych pozycjach literaturowych;

- w rozdziale drugim – autorka przedstawia modele fizyczne i matematyczne procesów wymiany ciepła w otwartej warstwie powietrznej w okresie zimowym. Następnie podaje algorytm rozwiązywania układów równań różniczkowych oraz wykonuje przykładowe obliczenia. Analiza wyników obliczeń pozwoliła autorce stwierdzić, że przyjęte we wcześniejszych opracowaniach upraszczające założenie o izotermiczności powierzchni doprowadza do znacznego błędu przy obliczeniu strumieni cieplnych (błąd około 80%) i do znacznego zawyżenia prędkości ruchu powietrza w warstwie powietrznej. Proponuje, w celu otrzymania dokładniejszych rezultatów przy rozwiązywaniu równań różniczkowych, metodę określenia współczynników temperaturowych, uwzględniających zmianę temperatury każdej powierzchni ograniczającej warstwę powietrzną. Ich wykorzystanie pozwala znacząco obniżyć błąd w bilansach cieplnych powietrza (błąd ok. 12%). Jeszcze lepsze rezultaty obliczeń otrzymuje w wyniku rozwiązywania równań

różniczkowych metodą różnic skończonych (błąd w bilansach cieplnych powietrza ok. 0,3 %);

- rozdział trzeci – to dalszy ciąg prezentacji modeli fizycznych i matematycznych procesów wymiany ciepła w otwartej warstwie powietrznej tym razem w okresie letnim. Opracowane przez autorkę modele matematyczne dla przezroczystych i nieprzezroczystych zewnętrznych części otwartej warstwy powietrznej opisują stacjonarny proces przenikania ciepła wraz z okresowymi przejściowymi procesami nagrzewania powietrza. Autorka prezentuje krytyczną analizę fizycznego sensu temperatury „słonecznej” i wysnuwa wniosek, że przy obliczeniach wymiany ciepła w warstwie powietrznej wykorzystanie temperatury „słonecznej” prowadzi do znacznych błędów;

- rozdział czwarty – zawiera porównania wyników obliczeń parametrów wymiany ciepła w otwartej warstwie powietrznej otrzymanych za pomocą opracowanych modeli matematycznych dla okresu zimowego i letniego z wynikami obliczeń uzyskanych przez uznanych autorów analizowanych pozycji literaturowych. Ponadto w rozdziale tym autorka przedstawia eksperyment badawczy, którego wyniki stanowiły podstawę praktycznej weryfikacji opracowanych modeli. Wynik weryfikacji potwierdził słuszność przyjętych założeń teoretycznych i udokumentował wiarygodność i praktyczną przydatność rezultatów pracy doktorskiej;

- rozdział piąty – to obszerne opracowanie praktycznych spostrzeżeń i wniosków wynikających z wykorzystania prezentowanych w pracy modeli do rozwiązywania problemów konstrukcyjnych, projektowych przegród budowlanych z otwartą warstwą powietrzną. W rozdziale tym autorka przedstawia również pomysł konstrukcji elementu pasywnego ogrzewania, którego efektywność w okresie letnim i zimowym oblicza wykorzystując opracowany model matematyczny;

- ogólne wnioski rozprawy doktorskiej – kończące przedstawioną do recenzji pracę, prezentują w punktach zrealizowany zakres prac, podkreślają znaczenie modelowania matematycznego w analizie złożonych procesów wymiany ciepła oraz praktyczną przydatność opracowanych modeli do celów projektowych i wykonawczych wentylowanych przegród budowlanych.

#### **Zauważone usterki i niejasności**

1. Język polski w ocenie fachowców jest bardzo trudny. Wielu Polaków ma problemy z poprawnym, zrozumiałym i bezbłędnym przedstawieniem tematów przemyśleń, sprawozdań z badań, wniosków czy podsumowań. Tym łatwiej można zrozumieć przed jakim wyzwaniem stanęła Pani Marianna Olenets, dla

której język polski nie jest językiem ojczystym. W efekcie praca mimo ogromnego wysiłku i starań ma bardzo dużą ilość błędów językowych różnego typu: stylistycznych, gramatycznych, składniowych, literowych i interpunkcyjnych. Nie mają one jednak wpływu na merytoryczną wartość pracy i nie brałem ich pod uwagę przy ostatecznej ocenie rozprawy. Uważam, że praca doktorska mgr Olenets zasługuje na odpowiednią korektę i publikację w formie podręcznikowej.

2. Przyjęta przez autorkę konwencja oznaczeń powtarzanych za źródłem spowodowała znaczny wzrost liczby objaśnień tych oznaczeń (kilkadziesiąt) i spore utrudnienie czytelności porównań opracowanych modeli matematycznych z modelami proponowanymi przez innych autorów. Niezrozumiałe natomiast jest wykorzystywanie przez autorkę w swoich modelach oznaczeń niezgodnych z polskimi normami (współczynniki przenikania ciepła  $U$ , przejmowania ciepła  $h$ , strumień ciepła  $\Phi$ , wewnętrzna temperatura przegrody budowlanej  $\vartheta_i$ , itp.). Dziwi też brak konsekwencji w przyjętych oznaczeniach raz prawie zgodnie z polskimi normami (patrz strona 64, 65) innym razem inaczej i niezgodnie.
3. Nie do końca można się zgodzić z modelem fizycznym strumieni ciepłych w otwartej warstwie powietrznej konstrukcyjnego elementu pasywnego ogrzewania budynku (rys. 3.3), a w konsekwencji jego matematycznym opisem. Z rysunku i jego opisu wynika, że ściana masywna nie jest doskonale czarna i część strumienia promieniowania słonecznego zostaje odbita trafiając na przegrodę przezroczystą gdzie również pewna jego część zostaje odbita, chyba że jest to przegroda idealnie transparentna. Nie znalazłem tego założenia w opisie a w związku z tym rzeczywisty mechanizm przenikania, odbicia i pochłaniania promieniowania słonecznego powinien wyglądać jak poniżej.

Strumień promieniowania słonecznego padającego na oszklenie dzieli się na trzy części:

- a) część przepuszczona, określana jako  $\tau_e \varphi_e$ ;
- b) część odbita, określana jako  $\rho_e \varphi_e$ ;
- c) część zaabsorbowana, określana jako  $\alpha_e \varphi_e$ ,

przy czym:

$\tau_e$  - jest współczynnikiem bezpośredniej przepuszczalności promieniowania słonecznego,  
 $\varphi_e$  - strumień energii słonecznej,

$\rho_e$  - jest współczynnikiem bezpośredniego odbicia promieniowania słonecznego,

$\alpha_e$  - jest współczynnikiem bezpośredniej absorpcji promieniowania słonecznego.

Suma tych trzech współczynników dla oszklenia jest równa 1.

$$\tau_e + \rho_e + \alpha_e = 1$$

Zaabsorbowana przez oszklenie część padającego strumienia promieniowania słonecznego, oznaczana jako  $\alpha_e \varphi_e$ , ulega następnie rozszczepieniu na dwie, zwykle nierówne części  $q_i \varphi_e$  oraz  $q_e \varphi_e$ , odpowiadające energii przekazywanej do wnętrza ( $q_i \varphi_e$ ) i na zewnątrz oszklenia ( $q_e \varphi_e$ ).

W związku z tym:

$$\alpha_e = q_i + q_e$$

gdzie:

$q_i$  - jest współczynnikiem wtórnego przekazywania ciepła przez oszklenie w kierunku wewnętrznym,

$q_e$  - jest współczynnikiem wtórnego przekazywania ciepła przez oszklenie w kierunku zewnętrznym.

Do obliczania współczynnika wtórnego przekazywania ciepła do wnętrza -  $q_i$ , niezbędne są współczynniki wtórnego przekazywania ciepła przez oszklenie w kierunku na zewnątrz -  $h_e$  i do wnętrza -  $h_i$ . Wartości te zależą głównie od usytuowania oszklenia, prędkości wiatru, temperatury zewnętrznej i wewnętrznej, a ponadto od temperatury obydwu powierzchni oszklenia.

W przedmiotowych normach na temat oszkleń, przyjmuje się pewne umowne warunki, jak:

- usytuowanie oszklenia w pozycji pionowej;
- dla powierzchni zewnętrznej:
  - prędkość wiatru około 4 m/s, emisyjność skorygowana 0,87;
- dla powierzchni wewnętrznej:
  - naturalna konwekcja, emisyjność opcjonalna;
- nie wentylowane przestrzenie powietrzne.

W tego rodzaju umownych, typowych dla okien warunkach, standardowe wartości  $h_e$  i  $h_i$  wynoszą:

$$h_e = 23 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

$$h_i = 3,6 + 4,4 \varepsilon_i / 0,837 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

gdzie  $\varepsilon_i$  - emisyjność skorygowana powierzchni wewnętrznej.

Dla niepowlekanego szkła sodowo-wapniowego i borokrzemianowego przykładowo  $\varepsilon_i = 0,837$ , a  $h_i = 8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

4. Eksperyment badawczy przeprowadzony przez autorkę weryfikuje w bardzo niewielkim zakresie opracowane modele matematyczne procesów wymiany ciepła w wentylowanych warstwach przegród budowlanych. Próba poszerzenia ilości danych eksperymentalnych pomocnych przy weryfikacji modeli, poprzez wykorzystanie pomiarów przeprowadzonych w ramach innej pracy badawczej zrealizowanej na Politechnice Świętokrzyskiej, niewiele w tym zakresie zmienia. Dotyczy bowiem podobnego rodzaju obiektu jaki posłużył autorce do uzyskania danych rzeczywistych. Faktyczna ocena większej dokładności (lepszego odzwierciedlenia rzeczywistości) i szerszej przydatności opracowanych modeli została dokonana w oparciu o analizę porównawczą z modelami innych autorów.

### **Podsumowanie i konkluzja**

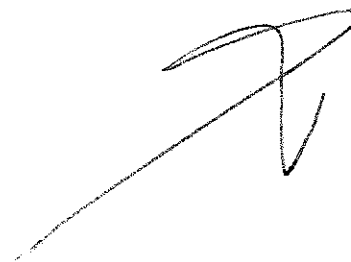
Pani mgr inż. Marianna Olenets przedstawiła bardzo ciekawą i potrzebną rozprawę doktorską. Poszerza ona wiedzę w zakresie badań i analizy złożonych procesów wymiany ciepła w przegrodach budowlanych z wentylowaną warstwą powietrzną. Autorka swobodnie porusza się w tym obszarze wiedzy wykazując znajomość zagadnienia i światowego dorobku naukowego. Należy podkreślić doskonałe przygotowanie teoretyczne, pełne zrozumienie istoty procesów wymiany ciepła i sprawne posługiwanie się modelem matematycznym zjawisk fizycznych. Przedstawione przez nią rysunki i schematy modeli fizycznych są bardzo czytelne i pomocne w analizie modeli matematycznych. Stąd moja sugestia publikacji podręcznika w oparciu o zrealizowaną pracę doktorską. Autorkę cechuje również duża dojrzałość wnioskowania i dobra intuicja badawcza pozwalająca unikać problemów nierozwiązywalnych, na obecnym poziomie wiedzy, bądź niezwykle skomplikowanych. Przedstawia ciekawe i lepiej, niż w analizowanych pozycjach literaturowych, udokumentowane rozwiązanie problemów a także pomysły praktycznego wykorzystania rezultatów pracy inspirujące do dalszych poszukiwań i eksperymentów.

*Reasumując, recenzowana praca doktorska jest autorskim rozwiązaniem, zaprezentowanego w niej zagadnienia badawczego. Autorka podjęła problem modelowania matematycznego złożonego procesu wymiany ciepła, który ma istotne znaczenie z punktu widzenia poznawczego i, co starała się udokumentować, praktycznego. Umiejętnie przyjęła założenia dotyczące sposobu jego rozwiązania i z powodzeniem je zrealizowała. Przeprowadzając swoje analizy wykazała się dobrą znajomością ogólnej*

*wiedzy teoretycznej, biegłością modelowania matematycznego problemów fizycznych,  
a także umiejętnością realizacji samodzielnej pracy naukowej.*

*Stwierdzam, że recenzowana praca spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim i  
niniejszym wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.*

Paweł Purgał

A handwritten signature in black ink, consisting of a long horizontal stroke followed by a loop and a vertical stroke.