



OPINIA

o pracy doktorskiej mgr inż. Agaty Świerc pt.

Wyznaczanie strat ciepła przez przenikanie istniejącego budynku mieszkalnego na potrzeby jego diagnostyki cieplnej

Niniejsza recenzja została opracowana na podstawie zlecenia Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej z dnia 17.12.2014. Promotorem pracy jest Dr hab. inż. Henryk Foit, prof. nzw. w Pol. Śląskiej.

1. UZASADNIENIE TEMATYKI ROZPRAWY

W rozwiniętych gospodarczo krajach sektor budownictwa jest jednym z największych konsumentów energii pierwotnej. Zużycie to szacuje się na poziomie przekraczającym nawet 40%. W strukturze zużycia energii pierwotnej budynku największy udział, bo sięgający 70% ma zapotrzebowanie ciepła na potrzeby ogrzewania i wentylacji. Zapotrzebowanie to zależy przede wszystkim od szeroko rozumianej izolacyjności budynków (straty przez przegrody) i systemu wentylacji, ale także od wielu innych czynników jak na przykład rodzaju wewnętrznych źródeł ciepła czy instalacji grzewczej.

W miarę dokładna metodologia diagnostyki w celu oceny zapotrzebowania zużycia energii na pokrycie potrzeb cieplnych budynku jest więc niezbędna w aspekcie odpowiedniego projektowania nowych budynków, modernizowania istniejących jak i ich eksploatacji pod kątem ograniczania zapotrzebowania na energię pierwotną. Metodologia taka wpisuje się w obowiązującą prawną konieczność sporządzania charakterystyki cieplnej budynku.

Sporządzenie w miarę dokładnej charakterystyki cieplnej budynku jest zadaniem złożonym i w ogólności bardzo trudnym, zwłaszcza jeżeli ocenie podlega stosunkowo długi przedział czasu, jak np. rok. W takim bowiem przypadku konieczne jest uwzględnienie procesów nieustalonych, a w tym zjawiska akumulacji ciepła w elementach struktury budynku. Metody obliczeniowe, bazujące na dokumentacji projektowej budynku są niezbyt dokładne (zwłaszcza w przypadku budynków istniejących). Zdecydowanie większą dokładność oceny dla budynków istniejących mają analizy bazujące na długoterminowych pomiarach, z tym że są one wyjątkowo trudne do przeprowadzenia i w praktyce stosowane okazjonalnie, np. w ramach projektów badawczych.

Mając to na względzie Autorka rozprawy postawiła sobie za cel opracowanie kompleksowej metodologii oceny wielkości strat ciepła przez przegrody budynku z wykorzystaniem zarówno modelowania matematycznego jak i krótkoterminowych pomiarów cieplnych. Z natury rzeczy metodologia ta ma mieć zastosowanie dla istniejących budynków, a zwłaszcza dla takich, w których straty ciepła przez przegrody stanowią dominującą pozycję w bilansie cieplnym budynku (np. starsze budynki z wentylacją naturalną, bez systemów chłodzenia itd.).

Z uwagi na istotne znaczenie utylitarne a także walory poznawcze niektórych wątków badawczych wybór celu rozprawy należy uznać za uzasadniony. Nie bez znaczenia jest tu również aspekt rozwojowy przeprowadzonych badań.

2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

W rozdziale 3 Autorka dokonała krótkiego przeglądu struktury budownictwa w Polsce oraz Unii Europejskiej w aspekcie normatywnych wymagań dotyczących ochrony cieplnej budynków.

W rozdziałach 4 i 5 zdefiniowano pojęcie diagnostyki cieplnej budynku wraz z elementami wchodzącymi w skład całej procedury. Opisano charakterystykę cieplną budynku oraz podstawowe grupy metod jej wyznaczania, tzn. metody analityczne i pomiarowe. Dokonano krytycznej analizy podstawowych uwarunkowań stosowania tych metod.

W rozdziale 6 opisano podstawowe elementy służące do identyfikacji stanu przegród budynku pod kątem procesu przenikania ciepła, a w szczególności oporu cieplnego i współczynnika przenikania ciepła składających się na pojęcie tzw. współczynnika strat ciepła przez przenikanie. Zwrócono uwagę na konieczność pomiarowej weryfikacji tych wielkości w celu zwiększenia dokładności identyfikacji. Na bazie analizy literaturowej omówiono i poddano krytycznej analizie niektóre ze stosowanych w praktyce metod.

W rozdziale 7 dokonano analizy głównych metod pomiarowych wykorzystywanych przy sporządzaniu charakterystyk energetycznych budynków. Dotyczy to metod stosowanych zarówno w odniesieniu do budynków testowych jak i budynków będących w trakcie użytkowania. Zwrócono uwagę na fakt, że w większości przypadków proces przenikania ciepła traktuje się jako ustalony. Pominięcie procesu akumulacji ciepła prowadzi jednak do zafałszowania wyników diagnostyki cieplnej budynku. Z tego też względu metodologia określania charakterystyki cieplnej budynku powinna uwzględniać proces nieustalonego przenikania ciepła, co jednak zdecydowanie komplikuje sposób aplikacji takiej metody z uwagi na konieczność stosowania stosunkowo krótkich kroków czasowych w odpowiednio długim okresie.

W rozdziale 8 przedstawiono podstawowe założenia zaproponowanej metody diagnostycznej opartej o model analityczno-pomiarowy. Część analityczną oparto o model bilansowy nieustalonego przenikania ciepła. Sformułowano równanie bilansu energii określające chwilowe zapotrzebowanie na moc cieplną użytkową. Zaproponowano zastosowanie metody bilansowej opartej o krótkotrwały pomiar zużycia ciepła, co pozwala, przynajmniej częściowo, wyeliminować trudny do określenia wpływ zysków od wewnętrznych źródeł ciepła. Zaproponowano własną modyfikację tej metody opartą o odpowiednio uśrednioną zastępczą temperaturę na zewnątrz budynku (tzw. miarodajna temperatura zewnętrzna). Pozwala to wyeliminować z rozważań wpływ promieniowania słonecznego na przegrody nieprzezroczyste oraz akumulację ciepła w tych przegrodach.

W rozdziale 9 przedstawiono podstawowe założenia własnego modelu matematycznego wyznaczenia nieustalonego pola temperatury w przegrodzie budowlanej dla potrzeb całego algorytmu diagnostycznego. Zdecydowano się na opracowanie własnego modelu opartego o metodę Exodus. O ile koncepcja budowy własnego modelu nie budzi w tym przypadku zastrzeżeń (własny kod źródłowy) to wybór samej metody (tzn. metody exodus) jest jednak dyskusyjny, a przedstawione uzasadnienie wyboru nie jest do końca przekonujące. Z drugiej jednak strony należy założyć, że zastosowanie każdej innej metody i tak prowadziłyby do niemal identycznych wyników. W związku z tym Autorka miała okazję wykazać się umiejętnością opracowania własnego modelu i programu komputerowego opartych o stosunkowo mało znaną i rzadko stosowaną metodę.

W rozdziale 10 przedstawiono wyniki obliczeniowe walidacji własnego modelu symulacyjnego poprzez porównanie z wynikami uzyskanymi z wykorzystaniem komercyjnego kodu Ansys CFX. Warunki brzegowe przyjęto na podstawie rzeczywistych wartości danych meteorologicznych (w tym temperatury powietrza zewnętrznego). Porównywano wartości zmiennej w czasie temperatury wewnętrznej ściany przegrody. Nie porównywano (i słusznie) wyników obliczeń modelu i wyników uzyskanych z pomiarów. Nie stwierdzono żadnych istotnych różnic pomiędzy wynikami. Przeprowadzono także analizę wrażliwości ze względu na zmiany szeregu danych wejściowych, a między innymi wartość kroku czasowego, wartości temperatury powietrza zewnętrznego (zmienna i uśredniona), pominięcie wpływu promieniowania słonecznego itd. Sformułowano wnioski z przeprowadzonej analizy walidacyjnej.

W rozdziale 11 przedstawiono wyniki analiz obliczeniowych z użyciem opracowanego modelu dla wybranych, a stosowanych w praktyce, przegród budowlanych. Przeprowadzono także pogłębioną analizę wrażliwości modelu między innymi z uwagi na niepewność danych wejściowych. Wykorzystano między innymi rzeczywiste dane meteorologiczne dla rejonu Katowic. Zwrócono między innymi uwagę na istotny wpływ zawilgocenia warstw przegrody na wyniki symulacji, a tym samym na wielkość strat ciepła przez przegrodę.

W rozdziale 12 przedstawiono wyniki zastosowania opracowanej metody diagnostycznej do analizy rzeczywistych budynków: jednorodzinny (referencyjny, niezamieszkały) i wielorodzinny. Szereg wielkości wejściowych do modelu oszacowano na podstawie wizji lokalnej oraz ankiet przeprowadzonych wśród przez lokatorów. Strumień ciepła dostarczanego do budynku wyznaczono w oparciu o odczyty z licznika ciepła lub pomiary pośrednie. Dokonywano pomiarów temperatury powietrza wewnątrz i na zewnątrz przegrody oraz temperatury powierzchni wewnętrznej przegrody. Dokonywano także pomiaru gęstości strumienia ciepła na powierzchni przegrody. Porównano wyniki symulacji z wynikami pomiarów. Jednym z celów przeprowadzonych badań było porównanie dokładności metody pojedynczego i dwukrotnego pomiaru. Ta ostatnia, przynajmniej teoretycznie, pozwala znacząco uprościć procedurę diagnostyki cieplnej budynku. Oszacowano niedokładność oceny zużycia ciepła dla różnych par dni reprezentatywnych, wykazując przy tym bardzo silną zależność pomiędzy wynikami oceny a wyborem konkretnej pary dni. Zastosowany do oceny niedokładności wskaźnik względny nie jest jednak wybrany właściwie, z uwagi na definicje wskaźnika i malejący do zera mianownik tejże definicji. Ostatecznie stwierdzono, że stosowanie metody dwukrotnego pomiaru może skutkować bardzo dużą niedokładnością wyników. Wady tej, przynajmniej częściowo, nie posiada proponowana metoda pojedynczego pomiaru przeprowadzanego w krótkich odstępach czasu. Przeprowadzona analiza dokładności tej metody wykazała, że bardzo silny wpływ na dokładność wyników ma głównie natężenie promieniowania słonecznego i prędkość wiatru. Stwierdzono, że poprzez wybór odpowiednich warunków zewnętrznych można uzyskać znaczącą poprawę dokładności predykcji zużycia ciepła.

3. PODSTAWOWE OSIĄGNIĘCIA BADAWCZE

Analizując całość rozprawy, za podstawowe merytoryczne osiągnięcia badawcze pracy i elementy nowości uznaję:

1. Przeprowadzenie krytycznej analizy (w tym weryfikacji obliczeniowej) różnych metod proponowanych do diagnostyki cieplnej budynków.
2. Opracowanie własnego algorytmu i kodu komputerowego wyznaczania nieustalonego pola temperatury podczas przenikania ciepła przez przegrodę budowlaną z zastosowaniem metody Exodus (niezależnie od faktu, że wybór tej właśnie metody

jest dyskusyjny). Utworzenie własnego algorytmu i kodu dla dość nietypowej metody w czasach powszechnego stosowania gotowych kodów komercyjnych potwierdza opanowanie warsztatu badawczego w tym zakresie.

3. Opracowanie kompleksowego analityczno-pomiarowego modelu oceny strat ciepła przez przegrody budowlane dla potrzeb diagnostyki cieplnej budynków. Zaletą modelu jest jego podwyższona dokładność (wykorzystanie danych pomiarowych) przy stosunkowo dużej łatwości aplikacji w warunkach realnych.
4. Przeprowadzenie weryfikacji dokładności modelu i jego wrażliwości na wybrane wielkości wejściowe zarówno w oparciu o symulacje analityczne jak i wyniki pomiarów przeprowadzone w warunkach rzeczywistych (dwa rodzaje budynków).
5. Opracowanie wytycznych prowadzenia pomiarów na obiektach rzeczywistych w celu osiągnięcia możliwie wysokiej dokładności predykcji strat ciepła.

4. PODSTAWOWE UWAGI KRYTYCZNE I DYSKUSYJNE

1. Rozdzielenie w równaniu (8.1) strumienia strat ciepła przez przenikanie Q_{Sp} i strumienia zysków ciepła od promieniowania słonecznego przez przegrody nieprzezroczyste Q_{zspn} jest fizycznie niepoprawne. Promieniowanie słoneczne wpływa bowiem na zmiany temperatury powierzchni przegrody, a to w konsekwencji skutkuje zmianą strumienia ciepła przez przenikanie. Nie obowiązuje tu reguła addytywności.
2. Istotną wadą metody Exodus w zastosowaniu do rozwiązywania zagadnień brzegowych jest duży spadek efektywności obliczeniowej w przypadku rozwiązywania zagadnień nieliniowych. W rozpatrywanych przez Doktorantkę zagadnieniach nieliniowość ta wiąże się ze zmianą w czasie (lub w funkcji temperatury) parametrów termofizycznych materiałów przegrody budowlanej, a zwłaszcza zmianą zawilgocenia. Co więc przesądziło, że ta właśnie metoda została wykorzystana.
3. Opracowana metodologia oceny strat ciepła przez przenikanie przez przegrody budowlane z wykorzystaniem modelu matematycznego przepływu ciepła przy niepewnych danych wejściowych i dodatkowo wyników pomiarów w wybranych punktach przegrody (np. na powierzchniach zewnętrznych) wpisuje się w problematykę tzw. odwrotnych problemów przepływu ciepła. Można się było więc pokusić o zastosowanie jednej z typowych metod stosowanych do rozwiązywania tego typu zagadnień, co pozwoliłoby na przykład na ilościową ocenę niepewności predykcji.
4. Przeprowadzone badania obejmowały różne ściany, ale nie uwzględniały zmienności warunków przenikania ciepła w obrębie danej ściany. Czy nie należało zbadać (przynajmniej dla jednej ściany) na ile uśredniona powierzchniowo wartość strumienia odbiega od wyznaczonej w wybranym punkcie na powierzchni przegrody. Do oceny jakościowej można na przykład wykorzystać pomiar termowizyjny.
5. Przy szacowaniu dokładności metody pomiaru jednokrotnego i dwukrotnego powinno się przeprowadzić analizę wpływu niedokładności samego pomiaru temperatury z uwagi na nieznaczne różnice temperatury podczas przenikania ciepła.
6. Szacowanie dokładności zużycia ciepła w oparciu o metodę dwukrotnego pomiaru z wykorzystaniem wskaźnika względnego jest bardziej spektakularne aniżeli precyzyjne (np. Rys. 12.18). Wynika to z przyjęcia takiego wskaźnika oceny, w którym wartość

mianownika bardzo często jest bliska zeru. Czy nie należałoby oprzeć te analizy o wskaźnik o innej postaci (nawet typu bezwzględnego)?

5. UWAGI SZCZEGÓŁOWE

1. Równanie bilansu energii w postaci wzoru (8.1) oraz wykres (8.1) nie są komplementarne.
2. Jaka jest definicja sprawności wykorzystania zysków ciepła i w jakich warunkach może być mniejsza od 100%?
3. Wszędzie tam, gdzie mówimy o różnicy temperatury czy „błędzie”? temperatury (np. całość Rozdziału 10), należy te różnicę wyrażać w Kelvinach a nie w stopniach Celsjusza.
4. To nie miarodajna temperatura (jej uwzględnienie) przyczynia się do zmiany wartości strumienia ciepła przez przenikanie (strona 107). Przyczyną jest występowanie fizykalnych czynników zewnętrznych (promieniowanie słoneczne, wiatr itd). Temperatura miarodajna nie jest czynnikiem fizykalnym a tylko pewną umownie zdefiniowaną wielkością obliczeniową.
5. W analizach przeprowadzonych w Rozdziale 11.3.1 i 11.3.2 zamiast mówić o wpływie błędnego określenia grubości warstwy izolacyjnej czy błędnego określenia orientacji przegrody budowlanej należy mówić o tylko o wpływie tych czynników, gdyż ich dokładne określenie nie nastrocza w praktyce większych problemów.
6. W pracy nadużywane jest sformułowanie „błąd”. W wielu przypadkach należy raczej mówić o niedokładności, odchyłce czy różnicy.
7. Należy mieć świadomość, że w przypadku analiz zużycia ciepła w budynkach zamieszkałych wyniki muszą być obarczone trudną do określenia ilościowego niedokładnością wynikającą z indywidualnych i stochastycznych zachowań mieszkańców.
8. Co właściwie chciała Autorka wyrazić poprzez wniosek nr 2 wniosków końcowych?

6. UWAGI REDAKCYJNE I STYLISTYCZNE

Praca jest napisana poprawnym językiem i w zasadzie nie zawiera usterek redakcyjnych i nieścisłości gramatycznych. Styl i układ pracy nie budzi też zastrzeżeń.

7. WNIOSEK KOŃCOWY

Opiniowana praca stanowi interesujący poznawczy wkład w zastosowanie metod modelowania matematycznego uzupełnionych o eksperyment pomiarowy do oceny strat ciepła przez przegrody zewnętrzne budynku i w następnie do predykcji zapotrzebowania ciepła.

Doktorantka wykazała się umiejętnością rozwiązywania problemów badawczych zarówno o charakterze analitycznym (np. opracowanie własnego algorytmu i kodu komputerowego wyznaczania nieustalonego pola temperatury podczas przenikania ciepła przez przegrodę budowlaną z zastosowaniem metody Exodus czy przeprowadzenie weryfikacji dokładności modelu i jego wrażliwości na wybrane wielkości wejściowe) a także o charakterze eksperymentu pomiarowego przeprowadzonego w warunkach rzeczywistych obiektów.

Wartością nie do przecenienia jest również synteza szczegółowych zagadnień badawczych do w miarę kompleksowego finalnego analityczno-pomiarowego modelu oceny strat ciepła przez przegrody budowlane dla potrzeb diagnostyki cieplnej budynków.

Przygotowany program badań został właściwie zaplanowany i zrealizowany, choć należy sobie zdawać sprawę z faktu, że dopracowanie metodologii będzie wymagało jeszcze licznych badań dodatkowych (zwłaszcza w wymiarze ilościowym w celu uzyskania odpowiednio wiarygodnej bazy statystycznej).

Do wyboru zastosowanych w pracy metod badawczych czy sposobu rozwiązywania poszczególnych problemów można mieć czasami wątpliwości czy zgłaszać uwagi o charakterze dyskusyjnym, ale nie podważają one wiarygodności uzyskanych rezultatów.

Układ logiczny rozprawy i jej strona redakcyjna są poprawne, dzięki temu percepcja treści pracy przez czytelnika jest stosunkowo łatwa.

Biorąc to wszystko pod uwagę stwierdzam, że cel pracy został osiągnięty, a Autorka wykazała się umiejętnością samodzielnego formułowania problemów naukowych i ich rozwiązywania. Uważam więc, że przedstawiona praca doktorska mgr inż. Agaty Świerc pt.

Wyznaczanie strat ciepła przez przenikanie istniejącego budynku mieszkalnego na potrzeby jego diagnostyki cieplnej odpowiada warunkom stawianym rozprawom doktorskim i może być dopuszczona do publicznej obrony, a doktorantka może ubiegać się o nadanie stopnia naukowego doktora w dyscyplinie *Inżynieria Środowiska*.



A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a vertical stroke, positioned to the right of the library stamp.