

Sprawozdanie

z wykonania usługi badawczo – rozwojowej
wskazanej w Deklaracji Uczestnictwa nr 65
objętej umową nr 2080/G1/Dz/09
z dnia 6.10.2009 r.

WYKONAWCA:

dr inż. Krzysztof Nakonieczny
zam. ul. Grażyny 16/11,
20-605 Lublin

Lublin, 5.12.2009



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

1. Opis problemu badawczo – rozwojowego przedsiębiorcy.

Problem badawczy nr 65:

Wpływ zastosowania innowacyjnych rolet zewnętrznych JackeR o podwyższonych wartościach termoizolacyjnych na zapotrzebowanie budynku na chłód.

Firma PPHU JackeR jest producentem zewnętrznych i wewnętrznych systemów osłonowych, m.in. rolet okiennych zewnętrznych. Zalety rolet zewnętrznych, poza ich funkcjami związanymi z antywłamaniowością, ochroną przed hałasem czy przed wpływem niszczycielskich czynników atmosferycznych, obejmują funkcję zabezpieczenia termicznego okien przed nadmiernym nagrzewaniem się pomieszczeń w lecie.

Zgodnie z istniejącą tendencją, wynikającą m.in. z zaleceń prawa budowlanego, ukierunkowaną na uzyskanie poprawy parametrów izolacyjnych przegród budowlanych, istnieje potrzeba prowadzenia badań nad doskonaleniem istniejących konstrukcji. Poprawa ta może być ukierunkowana zarówno na zmniejszenie strat ciepła z budynków w okresie grzewczym, jak też na zmniejszenie przenikania ciepła do budynku z zewnątrz w okresie letnim, gdy chodzi o utrzymanie umiarkowanej temperatury pomieszczeń i ograniczenie poboru energii przez urządzenia klimatyzacyjne. W przegrodach budowlanych największa wymiana ciepła odbywa się przez okna, a obecnie jest to problem tym bardziej istotny, jak wskazał Przedsiębiorca, że wymagane powierzchnie okien w stosunku do powierzchni podłogi uległy zwiększeniu. Istnieje więc w okresie letnim potrzeba ograniczenia napływu energii promieniowania słonecznego do pomieszczeń, co ma prowadzić do zmniejszenia zapotrzebowania budynku na chłód (energia klimatyzatorów).

Wymienione wyżej czynniki stały się inspiracją dla Przedsiębiorcy do ulepszenia istniejących konstrukcji osłon okiennych w aspekcie zmniejszenia zapotrzebowania budynku na chłód. Usprawnienie konstrukcji postanowiono osiągnąć przez zastosowanie rolety zewnętrznej JackeR o podwyższonych właściwościach termoizolacyjnych.

Cel badań:

Wprowadzenie wyżej wspomnianego usprawnienia konstrukcyjnego stwarza potrzebę udzielenia odpowiedzi na następujące pytania szczegółowe, co stanowi cel niniejszego opracowania. W jakim stopniu zastosowanie rolet o podwyższonych właściwościach termoizolacyjnych wpłynie na:

- a) redukcję przepuszczanego promieniowania słonecznego (transmisji),
- b) zwiększenie odbijania promieniowania słonecznego (refleksji) od przegrody okiennej,
- c) ograniczenie nagrzewania się powierzchni przegrody okiennej wskutek pochłaniania energii (absorpcji).

2. Zastosowane narzędzie badawcze.

Rodzaj postawionego problemu badawczego umożliwia zastosowanie dwojakiemu podejścia do jego rozwiązania. Pierwsze polegałoby na zbudowaniu stanowiska pomiarowego dla modelowego systemu okiennego z roletami, które pozwoliłoby na odtworzenie w sposób sztuczny warunków wymiany ciepła – porównywalnych z warunkami naturalnymi – lub umieszczenie stanowiska w taki sposób, aby poddane było ono naturalnym warunkom nasłonecznienia. Obydwie opcje pociągają za sobą znaczne koszty i wydaje się, że zastosowanie jednej z nich uzasadnione jest raczej na etapie doskonalenia istniejących już rozwiązań konstrukcyjnych a nie na etapie wstępnego rozpoznania zagadnienia ograniczenia zapotrzebowania na chłód.

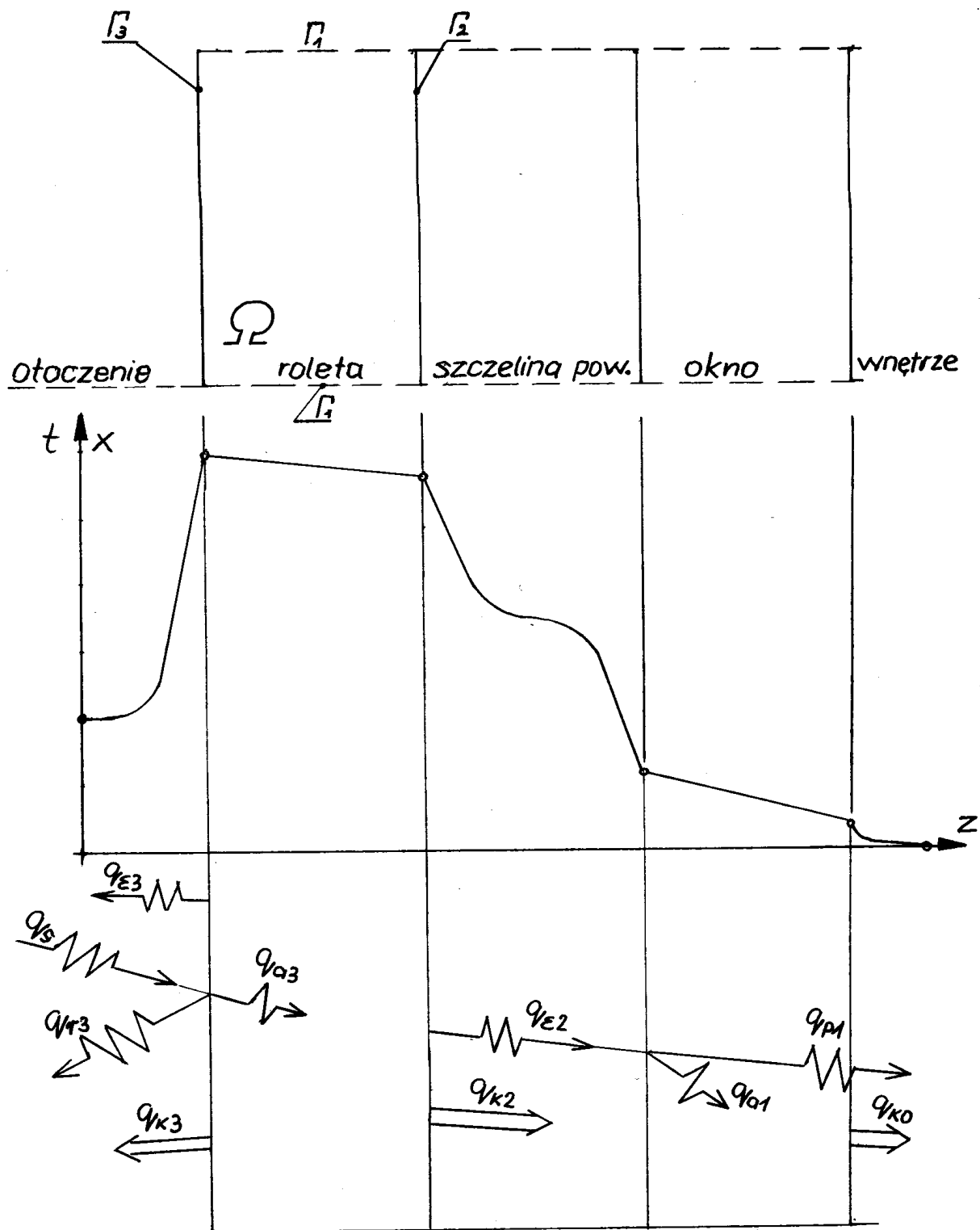
Drugie możliwe podejście do rozwiązania problemu, to zastosowanie metody obliczeniowej, która wymaga niższych nakładów, a jednocześnie pozwala na udzielenie odpowiedzi na postawione pytania w sposób na tyle zadowalający, na ile dokładny będzie zastosowany model obliczeniowy oraz na ile dostępne będą dane charakteryzujące badany obiekt.

Po rozważeniu korzyści i ograniczeń dotyczących obydwu sposobów realizacji zadania, w dyskusji z Przedsiębiorcą ustalono, że rozwiązanie postawionego problemu badawczego zrealizowanie zostanie metodą obliczeniową.

Metody obliczeniowe stosowane obecnie przy modelowaniu procesu wymiany ciepła w systemach okiennych opisano, między innymi, w publikacjach [1]-[3]. Ze względu na stosowany opis przestrzenny zjawisk transportu ciepła, można wymienić metody jednowymiarowe i wielowymiarowe. Z analizy literatury wynika, że standardowym podejściem, stosowanym obecnie w badaniach naukowych, jest modelowanie dwuwymiarowe konwekcji ciepła w szczelinach okiennych, także z uwzględnieniem radiacji [4]. Ma to uzasadnienie zwłaszcza przy analizie kompleksowych rozwiązań okiennych, w których stosowana jest wentylacja powietrza w przestrzeniach międzyszybowych, albo stosowane są niestandardowe wypełnienia szczelin, np. podlegające przemianie fazowej.

Jednocześnie należy zauważyć, że istnieje wiele wyników badań – zarówno doświadczalnych jak i teoretycznych – na temat konwekcji powietrza w szczelinach pionowych [5]-[7], i tego typu zagadnienie można z dobrze określoną dokładnością modelować z wykorzystaniem opublikowanych wzorów kryterialnych. Rozpatrywany w niniejszym opracowaniu problem wymiany ciepła dotyczy całego systemu okiennego, złożonego z okna oraz z dodatkowych przegród i szczelin powietrznych usytuowanych pomiędzy nimi. Zastosowanie wzorów kryterialnych do oceny konwekcji w tak złożonym systemie wydaje się więc w sposób naturalny uzasadnione przez ograniczenie czasochłonności obliczeń, gdyż pozwala uniknąć konieczności równoczesnego modelowania konwekcji w wielu przestrzeniach. Jest to tym bardziej uzasadnione, że w rozpatrywanym systemie okiennym dodatkowym problemem jest modelowanie przepływu ciepła przez roletę, która jest elementem o złożonym kształcie geometrycznym i niejednorodnym pod względem właściwości materiałowych.

Schematy systemów okiennych poddawanych badaniom zilustrowano na rys. 1 i rys. 2. Na rys. 1 przedstawiono system podstawowy, obejmujący roletę i okno, a na rys. 2 – system wzbogacony, obejmujący roletę, przegrodę (ekran) oraz okno. Na obydwu rysunkach, oprócz schematu systemu okiennego poddawanego analizie cieplnej, uwidoczniono również przykładowe rozkłady temperatury wzdłuż kierunku przenikania ciepła. Ponadto, zamieszczono tam także opis strumieni ciepła przepływających przez badane struktury okienne.



Rys. 1. Schemat systemu okiennego roleta + okno.

Oznaczenia symboli zamieszczonych na rys. 1 i rys. 2:

Ω – obszar obliczeniowy wycinka rolety; Γ_1 , Γ_2 , Γ_3 – brzegi obszaru obliczeniowego rolety, q_s – strumień energii promieniowania słonecznego, q_e – gęstość strumienia emisji promieniowania, q_r – gęstość strumienia energii promieniowania odbitego, q_a – gęstość strumienia absorpcji energii promieniowania, q_p – gęstość strumienia energii promieniowania przepuszczanego, q_k – gęstość konwekcyjnego strumienia energii.

Po przeprowadzeniu wstępnej analizy zagadnienia przepływu energii w rozpatrywanym systemie okiennym, do rozwiązania problemu przyjęto następujące narzędzia badawcze – modele obliczeniowe.

A. Wymianę ciepła w roletcie modelowano z wykorzystaniem równania przewodzenia ciepła w materiale niejednorodnym, anizotropowym, które zgodnie z [8],[9] ma następującą postać:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad \text{w obszarze } \Omega \text{ (rys. 1-2),}$$

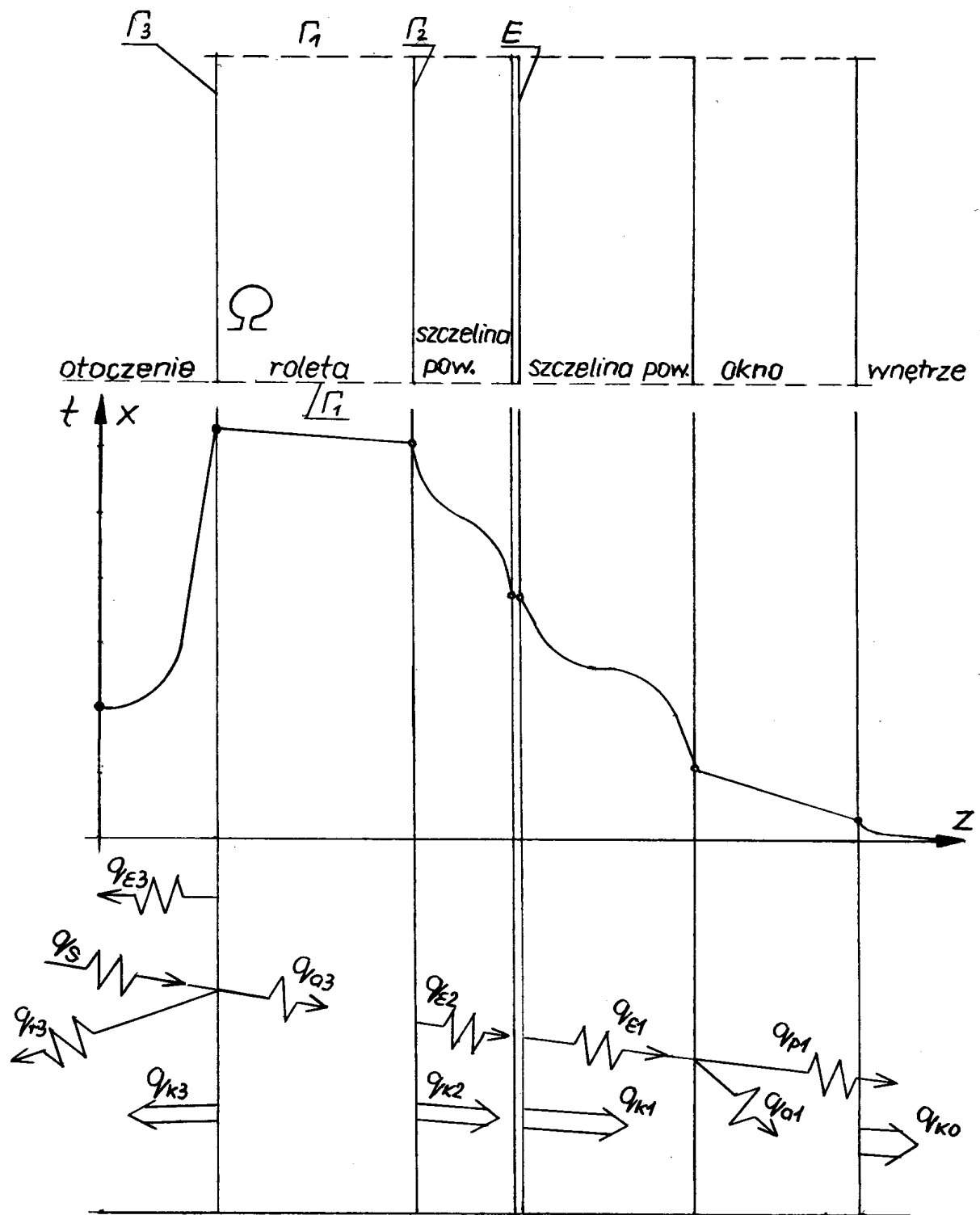
gdzie: ρ oznacza gęstość materiału rolety, c – ciepło właściwe, T – temperaturę, t – czas oraz k – tensor przewodnictwa cieplnego.

Warunki brzegowe, opisujące wymianę ciepła na powierzchniach bocznych obszaru Ω , przy założeniu że modelowaniu podlega niewielki wycinek rolety położony w osi przegrody okiennej, więc pole temperatury w kierunku równoległym do powierzchni rolety jest tam w przybliżeniu jednorodne, przedstawiają następujące wyrażenia:

– na brzegu Γ_1 – warunek izotermiczny $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$,

– na brzegu Γ_2 – warunek III-go rodzaju $-k_z \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_2(T_1 - T_2)$

gdzie: α_2 - współczynnik przejmowania ciepła ujmujący łącznie konwekcję i radiację, T_1 i T_2 – temperatury powierzchni przegród;



Rys. 2. Schemat systemu okiennego roleta + ekran + okno.

- na brzegu Γ_3 – warunek III-go rodzaju
$$-k_z \frac{\partial T}{\partial z} = a_3 E_s - \alpha_3(T_1 - T_2)$$

gdzie: a_3 – współczynnik absorpcji promieniowania dla powierzchni Γ_3 , E_s – całkowita energia bezpośredniego promieniowania słonecznego, padającego na powierzchnię Γ_3 , przyjmowana wg. modelu scharakteryzowanego w pracy [10], α_3 – współczynnik przejmowania ciepła ujmujący konwekcję i radiację w przestrzeni zewnętrznej.

Radiacyjny współczynnik przejmowania ciepła określano z wykorzystaniem standardowej zależności:

$$\alpha_r = \varepsilon_{1-2} \sigma (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2),$$

gdzie: ε_{1-2} - emisyjność wzajemna powierzchni 1 i 2, σ - stała Stefana-Boltzmana, równa $5.67 * 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.

B. Wymianę ciepła w szczelinach powietrznych systemu okiennego (nie uwzględniając samego okna) oceniono z wykorzystaniem wzorów kryterialnych zamieszczonych w pracy [7], przybierających ogólną postać

$$Nu = f(Ra, H/L),$$

gdzie: Ra – liczba Rayleigh'a, Nu – liczba Nusselta, H/L – stosunek grubości do wysokości szczeliny.

W wymienionej wyżej publikacji przedyskutowano wyniki badań wielu autorów i zaproponowane wzory kryterialne odzwierciedlają wyniki eksperymentów z odchyleniem standardowym poniżej 4%. Natomiast niepewność samego pomiaru w odniesieniu do liczb Ra i Nu nie przekraczała 6%.

C. Wymianę ciepła poprzez ekran, w przypadku promieniowania i konwekcji z ekranu nie stykającego się z roletą, modelowano przy założeniu równości temperatur obydwu powierzchni zewnętrznych przegrody. W przypadku powierzchni ekranu i rolety zetkniętych ze sobą, wymianę ciepła modelowano przy założeniu styku idealnego.

D. Wymianę ciepła przez okno, zgodnie z założeniem uzgodnionym z Przedsiębiorcą, modelowano przy wykorzystaniu stałej wartości współczynnika przenikania ciepła U , uwzględniającego zarówno konwekcyjną, jak i radiacyjną wymianę ciepła. Przyjęto założenie, że okno jest konstrukcją dwuszybową, charakteryzującą się współczynnikiem przenikania o wartości $U=2.0$ W/m²K (przeciętna wartość spotykana dla okien dwuszybowych).

E. Temperatura powietrza w przestrzeniach zewnętrznych – przyjęto, że temperatura na zewnątrz systemu okiennego wynosi 35°C, a temperatura wewnątrz pomieszczenia wynosi 25°C.

3. Przebieg wykonania usługi badawczo – rozwojowej.

Badania prowadzące do rozwiązania postawionego problemu obejmowały realizację następujących zadań cząstkowych.

1) Analiza obciążenia cieplnego systemu okiennego z roletą oraz systemu okiennego z roletą i przesłoną (ekranem) – zilustrowana została na rys. 1 i rys. 2.

2) Opracowanie algorytmu obliczeniowego obciążenia cieplnego systemu okiennego.

3) Przygotowanie danych do obliczeń symulacyjnych i zaplanowanie toku obliczeń.

Zgodnie z ustaleniami wstępnymi, przyjętymi w dyskusji z Przedsiębiorcą, obliczenia realizowano dla zakresu zmienności wybranych parametrów systemów okiennych – wg. zestawienia podanego w Tabelicy 1.

4) Adaptacja programu komputerowego do modelowania przewodzenia ciepła w obiekcie anizotropowym i heterogenicznym, jaki stanowi powtarzalny element rolety, z uwzględnieniem geometrii obiektu, struktury materiałowej oraz warunków brzegowych.

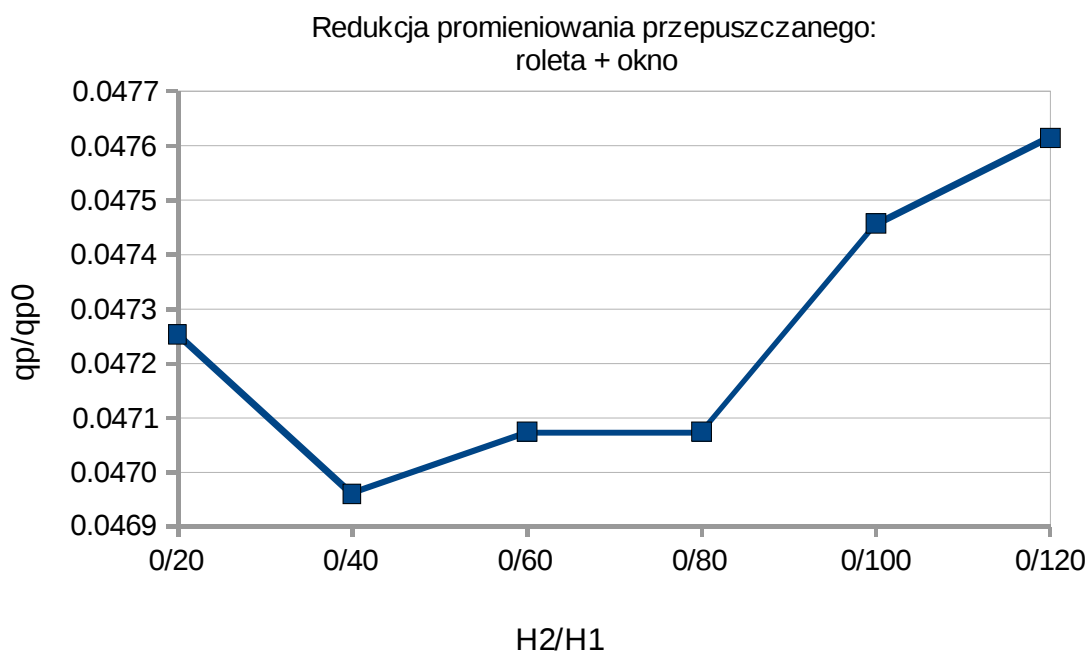
Tablica 1. Charakterystyka parametrów obliczeniowych badanych systemów okiennych.

Odmiana konstrukcyjna	Wielkość szczeliny H1, mm	Wielkość szczeliny H2, mm
Rozwiązanie roleta + okno		
R1a	20	0
R1b	40	0
R1c	60	0
R1d	80	0
R1e	100	0
R1f	120	0
Rozwiązanie roleta + ekran + okno		
ER1a	40	0
ER1b	25	15
ER1c	10	30
ER1d	60	20
ER1e	40	40
ER1f	80	0
Pozostałe parametry		
emisyjności:		
- rolety	0.87 (strona wklęsła) / 0.8 (strona wypukła)	
- ekranu	0.9 (strona biała) / 0.2 (strona aluminiowana)	
- okna	0.25	
Energia promieniowania słonecznego	611 W/m ² K	

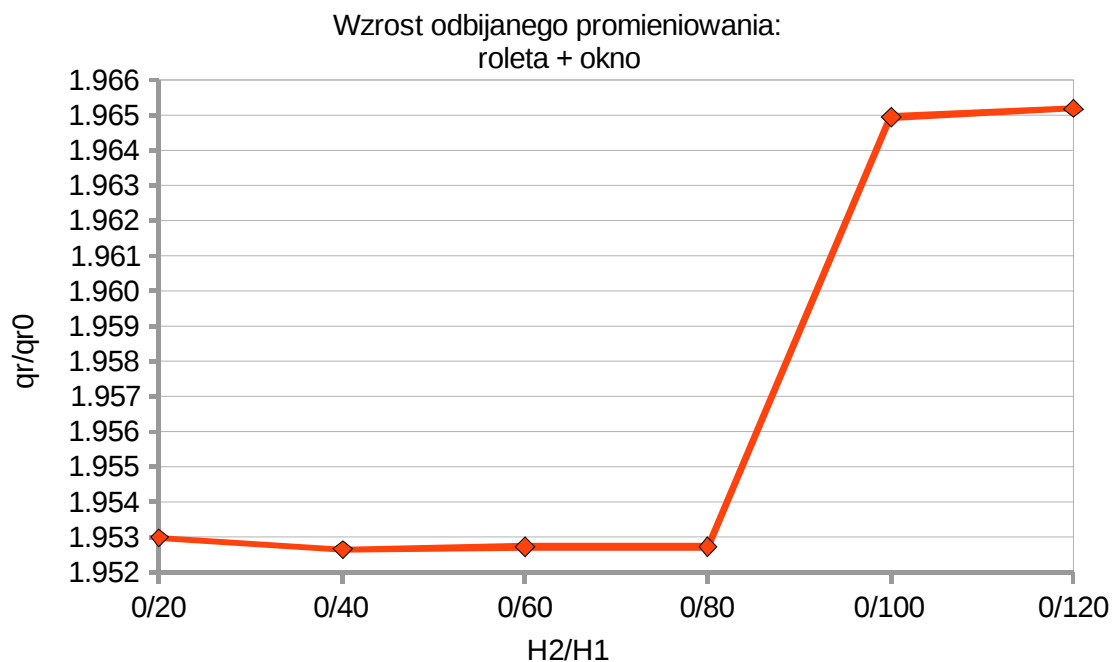
5) Wstępne testy numeryczne zaimplementowanego modelu obliczeniowego.

6) Obliczenia zadanych parametrów modelu: temperatur w wybranych punktach systemu okiennego oraz wielkości wynikowych, tzn. redukcji promieniowania przepuszczanego (transmisji), zmiany promieniowania odbitego (refleksji) oraz zmiany stopnia nagrzewania się szyby – w stosunku do nagrzewania się szyby okiennej bez rolety.

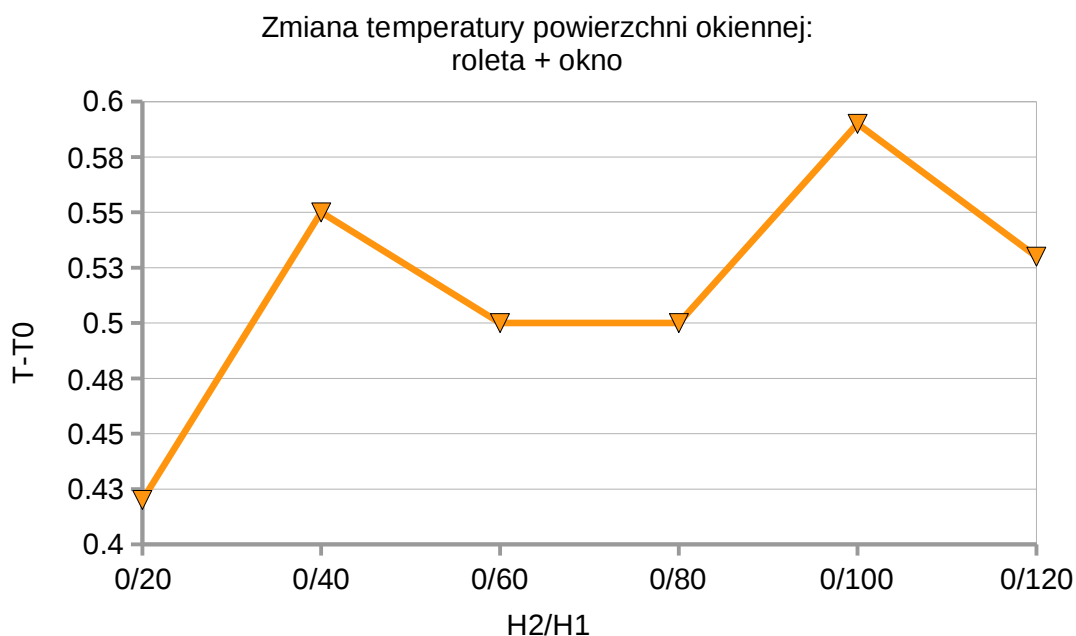
7) Opracowanie wyników obliczeń – zestawienie oszacowanych numerycznie efektów zastosowania rolet o podwyższonych właściwościach termoizolacyjnych na wykresach (rys. 3 ÷ rys. 8).



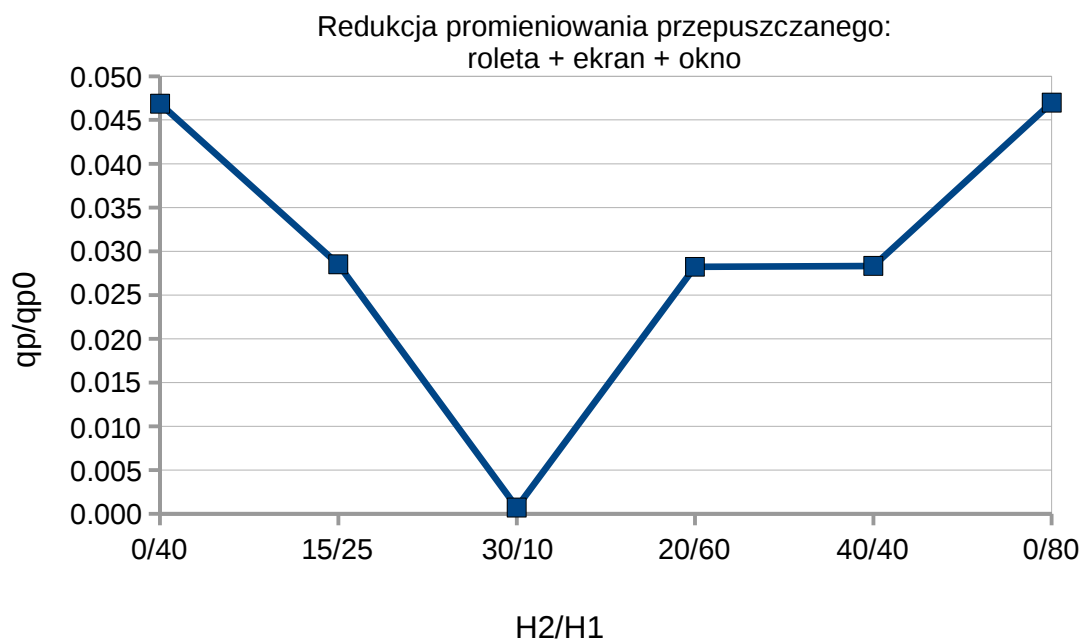
Rys. 3. Redukcja energii promieniowania przepuszczanego w systemie roleta + okno.



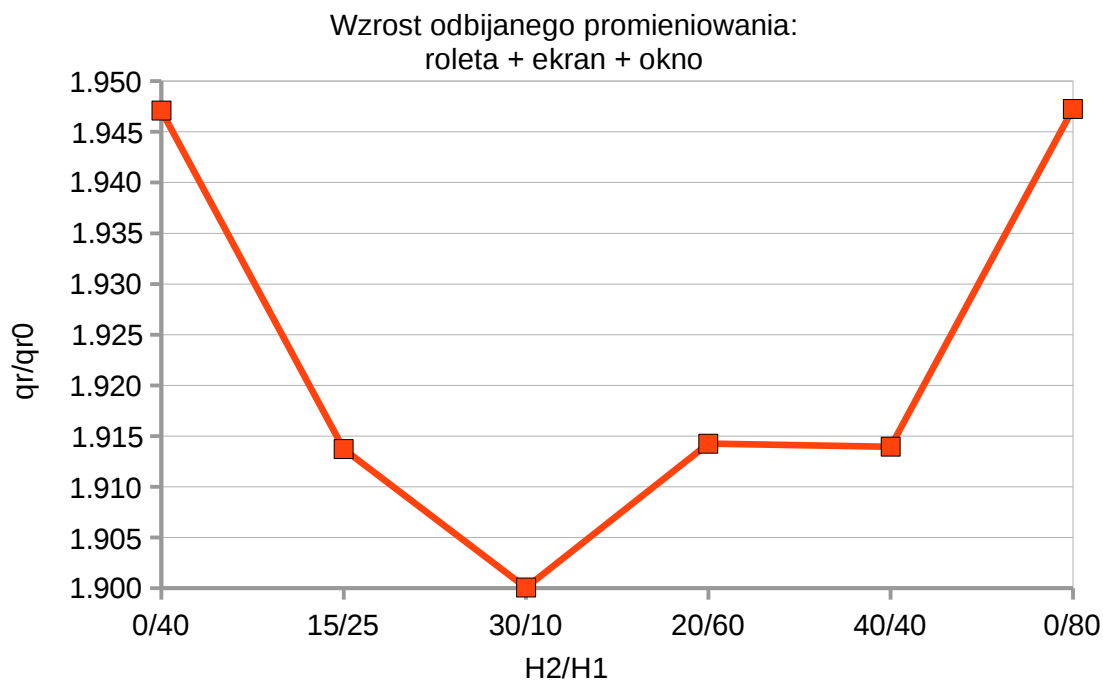
Rys. 4. Wzrost energii promieniowania odbitego w systemie roleta + okno.



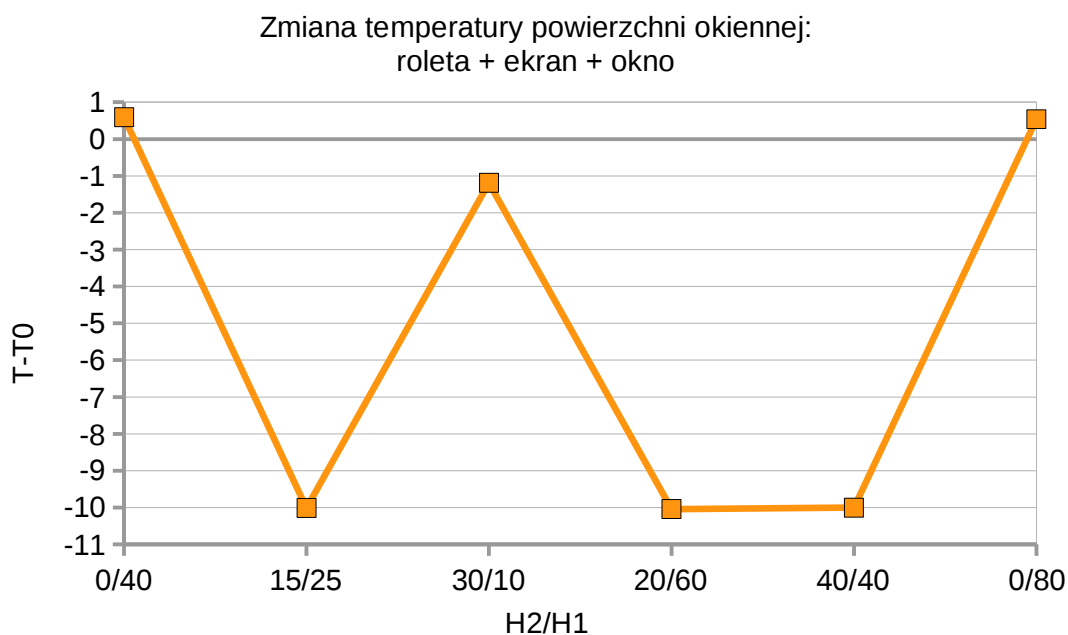
Rys. 5. Zmiana temperatury powierzchni okiennej w systemie roleta + okno.



Rys. 6. Redukcja energii promieniowania przepuszczanego w systemie roleta + ekran + okno.



Rys. 7. Wzrost energii promieniowania odbitego w systemie roleta + ekran + okno.



Rys. 8. Zmiana temperatury powierzchni okiennej w systemie roleta + ekran + okno.

4. Rekomendowane rozwiązanie oraz szczegółowy opis zastosowania wyników realizacji usługi badawczo – rozwojowej u przedsiębiorcy.

Analiza wyników obliczeń zestawionych na wykresach – rys. 3 ÷ rys. 8 – pozwala na wstępne zarekomendowanie układu konstrukcyjnego, który w zakresie przeprowadzonych badań wykazał się najkorzystniejszą charakterystyką termoizolacyjną w danym systemie okiennym (wg. Tablicy 1).

1) Ze względu na zdolność do redukcji promieniowania przepuszczanego przez system okienny, najlepsze właściwości prognozowane są dla konstrukcji R1b/ER1c, dla których uzyskano w obliczeniach zmniejszenie wielkości energii promieniowania przepuszczanego w

stosunku do wielkości prognozowanej dla samego okna, do wartości poniżej 4.7 % w przypadku rozwiązania R1b i blisko 0 dla rozwiązania ER1c.

2) Ze względu na zdolność odbijania promieniowania słonecznego, najkorzystniejsze wyniki prognozowane są dla rozwiązania R1f/ER1a/ER1f. W efekcie zastosowania tych rozwiązań, obliczeniowy wzrost wielkości energii odbitej w stosunku do promieniowania odbijanego od samego okna, wyniósł powyżej 94%.

3) W zakresie ograniczenia nagrzewania się powierzchni okna (szyby zewnętrznej), wskutek pochłaniania energii (absorpcji), najkorzystniejszą prognozę uzyskało rozwiązanie ER1b/ER1d/ER1e. Obliczeniowy spadek temperatury powierzchni zewnętrznej szyby w tych przypadkach wyniósł ok. 10°C. Natomiast w przypadku systemu roleta + okno nie stwierdzono spadku temperatury.

Bibliografia:

1. K. Larsson et al., Thermal analysis of super insulated windows (numerical and experimental investigations). *Energy and Buildings* 29 (1999) 121-128.
2. Wright, A correlation to quantify convection heat transfer between vertical window glazings. *ASHRAE Trans.* 106 (1996) 940-946.
3. N. Abodahab and T. Muneer, Free convection analysis of a window cavity and its longitudinal temperature profile. *Energy Conv. Mngmt* 39 (1998) 257-267.
4. K.A.R. Ismail, J.R. Henriquez, U-values, optical and thermal coefficients of a composite glass systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 52 (1998) 155-182.
5. A.S. Krishnan, C. Balaj, An experimental correlation for combined convection and radiation between parallel vertical plates. *J. Heat Transfer*, 126 (2004) 849.
6. La Pica, Rodono, Volpes, An experimental investigation on natural convection of air in a vertical channel. *Int. J. Heat and Mass Transfer* 36 (1993) 611-616.
7. S. M. Elsherbiny, G.D. Raithby, K.G.T. Hollands, Heat transfer by natural convection across vertical and inclined air layers. *ASME J. Heat Transfer* 104 (1982) 96-102.



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



8. H.S. Carslaw, J.C. Jaeger, Conduction of Heat in Solids. Oxford Clarendon Press, 1959, 39-43.
9. T. Sadowski, M. Boniecki, Z. Librant, K. Nakonieczny, Theoretical prediction and experimental verification of temperature distribution in FGM cylindrical plates subjected to thermal shock. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 50 (2007) 4461-4467.
10. T. Hobler, Ruch ciepła i wymienniki. WNT, Warszawa 1986.

WYKONAWCA:

dr inż. Krzysztof Nakonieczny

zam. ul. Grażyny 16/11
20-605 Lublin



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



1