

## OKREŚLENIE WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNYCH DLA MODYFIKOWANYCH GEOMETRYCZNIE MATERIAŁÓW IZOLACYJNYCH

Bożena ORLIK-KOŹDOŃ; Tomasz STEIDL

Politechnika Śląska, Katedra Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli  
ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice, e-mail: Bożena.Orlik-Kozdon@polsl.pl; , e-mail: Tomasz.Steidl@polsl.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono pierwszy etap prac zmierzających do uzyskania nowej płyty termoizolacyjnej przeznaczonej do wykonywania ociepleń od strony zewnętrznej w systemach ETICS (*External Thermal Insulation Composite System*). Płyta będzie wykonana ze sztywnych materiałów izolacyjnych i modyfikowana geometrycznie poprzez wykonanie w niej kanałów o zróżnicowanej konfiguracji i kształcie otworów. Projektowane w płycie kanały mają służyć zmniejszeniu ciężaru płyty i ograniczeniu zużycia materiału do jej wykonania. Celem prowadzonej analizy będzie rozpoznanie natury przepływu ciepła w zaprojektowanym komponencie budowlanym w warunkach przepływu niskotemperaturowego oraz zaprojektowanie modelu płyty z taką konfiguracją i kształtem kanałów, dla którego proporcje kosztów wytworzenia do parametrów cieplnych (R-opór cieplny, TE-efektywność cieplna) będą optymalne. Innowacyjne podejście do stworzenia płyt z zaprojektowanymi imperfekcjami jest chronione zgłoszeniem patentowym Wp. 22285.

**Słowa kluczowe:** imperfekcje geometryczne, kanałowa płyta izolacyjna, efektywność cieplna, opór cieplny komponentu, materiał do izolacji cieplnej

### 1. WPROWADZENIE

Na rynku budowlanym mamy szeroki asortyment materiałów do izolacji cieplnej przegród. Różnią się one między sobą rozwiązaniami materiałowymi, ale łączy je wszystkie niski współczynnik przewodności cieplnej. Obecnie producenci materiałów budowlanych poszukują coraz to bardziej nowoczesnych – i przede wszystkim – tanich rozwiązań, które pozwoliłyby na osiągnięcie równie wysokiej efektywności cieplnej jak tradycyjne materiały izolacyjne.

W swojej pracy Autorzy proponują nowatorskie rozwiązanie w postaci kanałowej płyty do izolacji cieplnej

wykonanej ze sztywnych materiałów izolacyjnych typu polistyren EPS, XPS, pianka PIR, PUR [17].

W zastosowaniach praktycznych spotkać już można modyfikacje geometryczne płyt- materiałów izolacyjnych [10,11]. Jako bliższy przykład można podać płyty klimatyczne EPS [13]. Zastosowane w nich perforacje polegają na wykonaniu mikrootworów równoległych do kierunku przepływu ciepła. Rozwiązanie ma na celu poprawę parametrów dyfuzyjnych materiału z Zachowaniem wysokich standardów cieplnych płyt. Wykorzystywane są one w tradycyjnych systemach etics. W większości przypadków jednak modyfikacje geometryczne materiałów budowlanych służą poprawie cech akustycznych i znajdują powszechne zastosowanie w izolacjach dźwiękowych. [12,14,15,16]

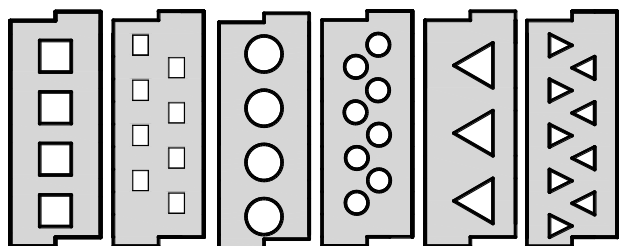
Autorka w swoim pomysłe bazowała na własnych doświadczeniach [5] jak również na badaniach postawionych w pracach [1,2,3]. Przedstawione tam rozważania dotyczą głównie elementów o dużej przewodności cieplnej takich jak np. betony lub ceramika z zaprojektowanym zaburzeniami w postaci szeregu otworów wypełnionych powietrzem lub wkładkami z materiałów o bardzo dobrej izolacyjności cieplnej.

Modyfikacje geometryczne płyt, nazywane przez autorkę również imperfekcjami stanowią celowe zaburzenie geometrii materiału izolacyjnego o pozytywnym charakterze, mającym na celu uzyskanie oszczędności materiału z równoczesnym niepogorszeniem parametrów fizyczno-mechanicznych powstałego komponentu. Przedmiotem analizy jest typowa płyta sztywna z materiału termoizolacyjnego [17] z zaprojektowanymi imperfekcjami geometrycznymi w postaci kanałów usytuowanych poziomo lub pionowo do długości płyty w jednym lub kilku rzędach.

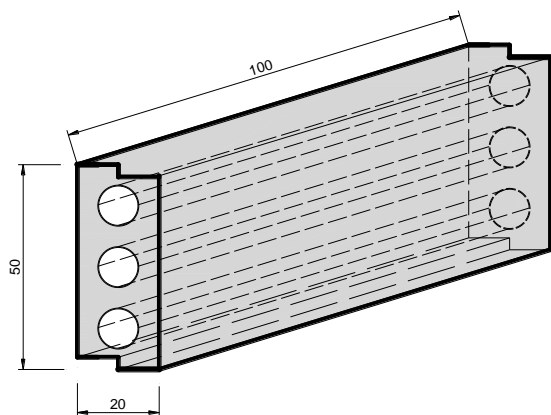
W referacie przedstawiono wyniki obliczeń wpływu kształtu, rozmieszczenia w przekroju płyty i pola powierzchni modyfikacji geometrycznych, nazwanych imperfekcjami, na parametry cieplne komponentu tj opór cieplny R.

## 2. PROPONOWANE MODYFIKACJE GEOMETRYCZNE DLA MATERIAŁÓW SZTYWNYCH

Przedmiotem analiz jest płyta prostokątna do wykonywania izolacji cieplnej ścian budynku. W płycie zaprojektowano otwory o wstępnie wybranych przekrojach: kołowym, trójkątnym o krawędziach ostrych i zaokrąglonych, oraz o przekroju w postaci wieloboku z różną konfiguracją rozmieszczenia kanałów: w jednym lub kilku rzędach poziomych równoległe do długości płyty oraz pionowych. (rys.1, 2, 3). Do dalszej analizy wybrano płyty z otworami usytuowanymi w jednym rzędzie, symetrycznie w stosunku do kształtu płyty. Obliczenia wykonano dla płyty z różnymi wariantami kształtów kanałów tj: kwadrat, trójkąt oraz koło ustawionych w jednym rzędzie. Dodatkowo przyjęto, iż całkowite pole powierzchni otworów nie będzie większe niż 40% całkowitej powierzchni przekroju. Wybrane kształty służą wyłącznie analizie poznawczej.



Rys.1. Wybrane przykłady imperfekcji płyty kanałowej, przekrój  
Fig. 1 Selected examples of imperfection of channel plate, horizontal section



Rys.2. Przykład geometrii płyty kanałowej z wybraną imperfekcją w przekroju: z kanałami poziomymi w jednym rzędzie  
Fig. 2. Examples of channel plate's geometry with chosen imperfection in cross-section with horizontal channels in a single row



Rys.3. Przykład prototypu płyty  
Fig.3. Example, prototype boards

## 3. ZAŁOŻENIA PRZYJĘTE DO ANALIZY

Do analizy przyjęto płytę o grubości 20cm z kanałami ułożonymi poziomo w jednym i dwóch rzędach. Dla celów porządkowych wprowadza się następujące oznaczenia płyty : imperfekcje o kształcie kwadratu: M\_KW, trójkąta równobocznego: M\_T, koła:M\_K. Symbol np. M\_K\_3 imperfekcję o przekroju koła o średnicy 3cm lub M\_KW(T)\_3: wielokąt (kwadrat, trójkąt) o boku 3cm. Dla każdego modelu wymiary imperfekcji były dobrane w kilku wariantach, tak aby sumaryczna ich powierzchnia w przekroju płyty nie była większa niż 40% (konieczność zachowania parametrów wytrzymałościowych płyt-przedmiot dalszych badań). Ułożenie otworów było zgodne z osią symetrii płyty z równoczesnym zachowaniem odległości 5cm od podłużnej krawędzi płyty. Analizę prowadzono przy założeniu, że kanały wypełnione są powietrzem i stanowią szczelinę ograniczoną(zamknięcie kanałów folia) o emisyjności ścianek  $\epsilon = 0.9$ . Rozpatrzono również przypadek, w którym powierzchnia kanałów jest pokryta cienką warstwą materiału o niskim współczynniku absorpcji promieniowania niskotemperaturowego  $\epsilon = 0.1$ . Rozważono dwa ułożenia płyty: pionowe i poziome. Dla tak zaprojektowanej płyty wykonano obliczenia: całkowitego oporu cieplnego płyty i gęstości strumienia ciepła. Dla zaprojektowanych imperfekcji określono wpływ przyjętej powierzchni kanałów na intensyfikację ruchu konwekcyjnych z wykorzystaniem liczby Nusselta. Liczba Nuselta charakteryzuje intensywności wymiany ciepła, powodowanej konwekcją swobodną w stosunku do czystego przewodzenia. Kanały potraktowano, jako szczelinę, w której występuje złożona wymiana ciepła obejmująca promieniowanie i konwekcję. Zjawisko to opisane zostało wielkością  $k_{eff}$ . (wzór nr 1). Obliczenia wykonano przy użyciu programu Therm 7.2. Program ten oparty jest na wykorzystaniu MES do obliczeń przepływu ciepła dla dowolnego dwuwymiarowego modelu geometrycznego.

Do obliczeń przyjęto następujące warunki brzegowe:

- temperatury obliczeniowe – jak dla stacji meteo Katowice  $t_e = -2,4 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- temperaturę środowiska wewnętrznego dla normalnych warunków eksploatacji  $t_i = +20^\circ\text{C}$ ,
- współczynniki przejmowania ciepła  $h_e = 25,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ;  
 $h_i = 7,69 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ,
- współczynnik absorpcji promieniowania  $\varepsilon = 0.9$  dla wariantu\_1 i  $\varepsilon = 0.1$  dla wariantu\_2.

Na potrzeby obliczeń przyjęto, że materiałem izolacyjnym będzie polistyren ekspandowany o współczynniku przewodności cieplnej  $\lambda = 0.038 \text{ [W/mK]}$ .

#### 4. OPIS ROZPATRYWANYCH ZJAWISK

Dla rozpatrywanych płyt kanałowych ich efektywność cieplna zależy między innymi od rodzaju materiału izolacyjnego jak również od rodzaju gazu wypełniającego przestrzeń, kanałów. Strumień ciepła przepływający przez tego typu izolację jest sumą składowych strumienia ciepła przepływającego przez promieniowanie, przewodzenie jak i konwekcję przez wypełniający gaz, oraz na skutek przewodzenia przez element stały [4,9]. W swojej pracy autorzy uwagę poświęcili głównie złożonej wymianie ciepła, która ma miejsce w zamkniętych, ograniczonych szczelinach powietrznych. Dla potrzeb analizy wprowadzono założenie, że gęstość strumienia ciepła jest równa sumie gęstości strumienia ciepła przekazywanego przez konwekcję i promieniowanie. W przypadku konwekcji opis wnikania ciepła w przestrzeni ograniczonej jest skomplikowany z uwagi na małe rozmiary rozpatrywanej powierzchni. W większości spotykanych w literaturze opisów, badacze posługują się zależnościami wyznaczonymi empirycznie [8,9]. Autorzy założyli, że na obecnym etapie badań ruchu powietrza w przestrzeni imperfekcji opisany jest efektywnym współczynnikiem  $k_{eff}$ , [W/mK] a w opisie zjawisk intensyfikację wymiany ciepła opisywać będzie liczba Nusselta . [6]

$$k_{eff} = (h_{cv} + h_r) \cdot d \quad (1)$$

gdzie:

$h_{cv}$ -konwekcyjny współczynnik transportu ciepła [w/(m<sup>2</sup>k)]

$h_r$  -radiacyjny współczynnik transportu ciepła [w/(m<sup>2</sup>k)]

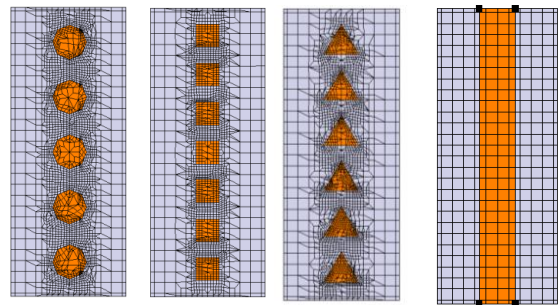
d- grubość warstwy (szczeliny) [m]

Uzyskana wielkość  $k_{eff}$  została wykorzystana przez autorów do obliczenia ekwiwalentego oporu cieplnego przy ocenie efektywności cieplnej płyty.

Przedstawiony w pracy model transportu ciepła w komponencie ma charakter uproszczony i jest modelem wstępnym, który zostanie zweryfikowany w oparciu o wyniki badań empirycznych.

#### 5. WYNIKI OBLICZEŃ I ICH ANALIZA

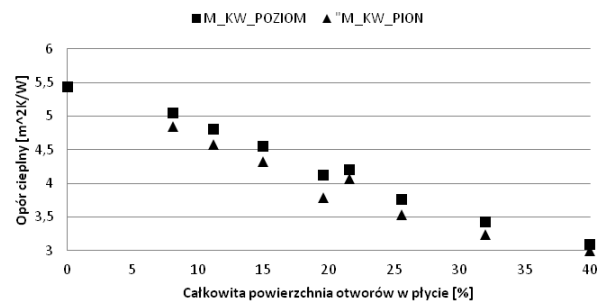
Cały zakres badań nad konfiguracją i geometrią otworów podzielono na etapy. W pierwszym określono zależność parametrów cieplnych od kierunku ułożenia i wielkości kanałów. Obliczono liczbę Nusselta  $Nu=f(Ra)$  oraz wielkość  $k_{eff}$ . [6] Za podstawowy cel wstępnej analizy uznano uzyskanie zależności między oporem cieplnym a polem powierzchni przekroju imperfekcji, pozwalającej na optymalizację ich wymiarów w stosunku do całkowitej powierzchni płyty. Uzyskane wyniki pozwoliły w dalszej części badań przyjąć zasadniczy kierunek ułożenia kanałów, oraz modele podstawowe dla trzech kształtów geometrycznych jak na rys. 4.



Model M\_K Model\_M\_KW Model M\_T M\_(K;KW;T)\_Pion

Rys.4. Modele podstawowe płyty z zaznaczoną siatką MES przyjęte do analizy

Fig.4 Basic models of the slab accepted for analysis with FEA mesh



Rys.5. Zależność oporu cieplnego od całkowitej powierzchni imperfekcji w płycie

Fig.5 Dependence of thermal resistivity on the total area of imperfections in the slab

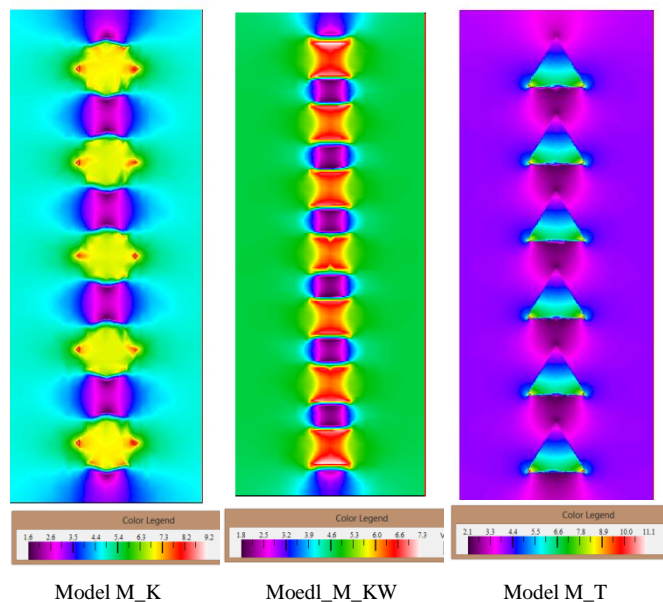
Z obliczeń, dla których wyniki prezentowane są na rys. nr 5 wynika, że konfiguracja kanałów w kierunku poziomym jest korzystniejsza w kontekście efektywności cieplnej

Opór cieplny płyt z kanałami poziomymi równoległymi do jej dłuższego boku jest w granicach od 0.35 do 0.25

[m<sup>2</sup>K/W] większy od oporu cieplnego płyty z kanałami pionowymi.

Do dalszej analizy przyjęto płyty z kanałami poziomymi równoległymi do osi dłuższej płyty. Analizowano następujące kształty: koło, kwadrat oraz trójkąt.

Obliczenia prowadzono dla dwóch warunków emisyjności powierzchni brzegów kanału tj. wariant\_1: ε=0,9 (oznaczenia M\_K; M\_KW; K\_T) oraz w wariantie\_2: ε=0.1 (oznaczenia: M\_K\_E; M\_KW\_E; M\_T\_E).

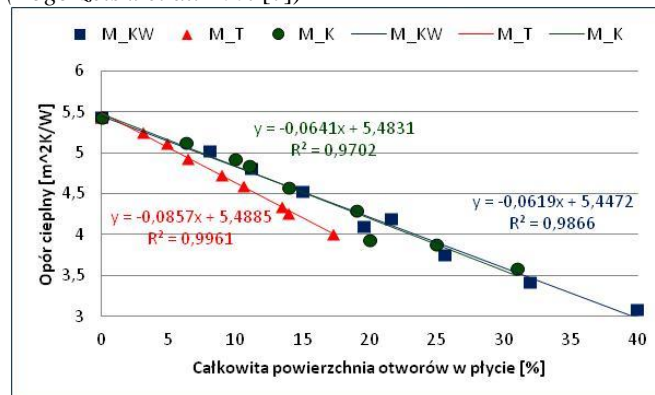


Rys.6. Wizualizacja rozkład gęstości strumienia ciepła dla wybranych modeli.

Fig.6 Visualization of the distribution of heat flux density for the selected models

Analizując wyniki uzyskane dla wariantu, w którym przyjęto współczynnik emisyjności promieniowania ε=0,9, obserwujemy, że najkorzystniejszą modyfikacją geometryczną pod względem parametrów cieplnych jest koło (rys.7.). Stwierdzono niewielkie różnice w wynikach obliczeń oporu cieplnego dla tej formy modyfikacji oraz kwadratu. Intuicyjnie sądzić by można, że koło jest figurą korzystniejszą w kontekście procesów przepływu ciepła niż kwadrat. Dodać w tym miejscu należy, że przy modelowaniu procesów przepływów w kanale dla kształtów innych niż koło przyjmowany jest simpleks geometryczny tj. jeżeli przekrój nie jest kołowy przyjmuje się średnicę zastępczą, co również nie jest bez znaczenia w prowadzonych analizach. Wątpliwości rozwiane zostaną w trakcie badań laboratoryjnych w aparacie płytowym i skrzynce grzejnej (wybór obu metod podyktowany jest różną konfiguracją otworów w płycie: pion, poziom; oraz zastosowaniem

osłony kanałów w postaci materiału niskoemisyjnego (Pogorzelski et al. 2007[7])



Rys. 7. Zależność oporu cieplnego od całkowitej wielkości imperfekcji w płycie dla emisyjności ścianek równej 0.9

Fig.7 Dependence of thermal resistivity on the total area of imperfections in the slab for the emissivity of walls equal to 0.9

Korzystając z obliczonych wartości oporu cieplnego i znanej wartości pola powierzchni dopasowano wstępnie funkcje liniowe. Funkcje te nie posiadają wyraźnego ekstremum.

Wydają się one być jednak dobrym sposobem opisu złożonych zjawisk w komponencie z uwagi na wysoki współczynnik korelacji powyżej 0.9. Autorzy na podstawie uzyskanej funkcji liniowej proponują do opisu oporu cieplnego modyfikowanych płyt zależność w postaci:

$$R_m = R_p - \eta \cdot A_f \quad (2)$$

gdzie:

$R_m$  – opór modyfikowanej płyty [m<sup>2</sup>K/W]

$R_p$  – opór płyty pełnej [m<sup>2</sup>K/W]

$\eta$  – współczynnik kształtu: dla kwadratu 0.062; koła 0.064; trójkąta 0.086

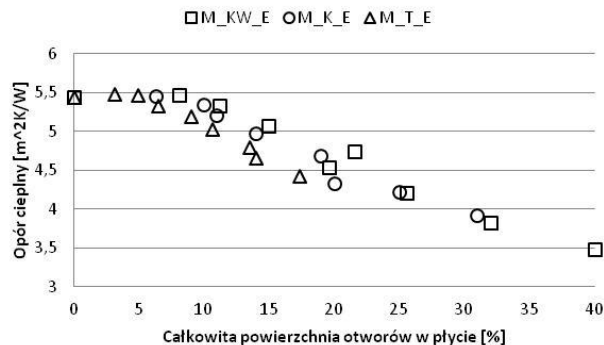
$A_f$  – powierzchnia otworów w płycie [%]

Powyższa zależność prawdziwa jest tylko w przypadku określonej konfiguracji i kształtów otworów. Nie bez znaczenia jest również materiał osnowy, którego przewodność cieplna musi być nie większa niż 0.06 [W/mK].

Do pomiarów rzeczywistego oporu ciepła w aparacie płytowym i skrzynce grzejnej wstępnie wytypowane zostaną próbki, których obliczeniowy opór cieplny nie jest mniejszy niż 4.5 [m<sup>2</sup>K/W].

W wariantie drugim, dla którego emisyjność, ścianek kanału wynosiła 0.1 w sposób zdecydowany można zauważyć poprawę jakości cieplnej płyt wyrażonej poprzez wzrost wartości oporu cieplnego (rys.8). Najkorzystniejsza zmiana oporu cieplnego R, występuje dla imperfekcji w kształcie kwadratu. Dla wszystkich kształtów zmniejszyła się wartość  $k_{eff}$ , ujmująca w tym wariantcie

głównie zjawisko konwekcji z niewielkim wpływem radiacji.[6]



Rys. 8. Zależność oporu cieplnego od całkowitej wielkości imperfekcji w płycie dla emisyjności ścianek równej 0.1  
Fig.8 Dependence of thermal resistivity on the total size of imperfections in the slab for the emissivity of walls equal to 0.1.

## 6. UWAGI KRYTYCZNE I PODSUMOWANIE

Obliczenia numeryczne wykonywane za pomocą programów komputerowych opartych o metodę elementów skończonych zawierają tak zwany błąd metody. Przedstawione w artykule obliczenia wykonywano zakładając w programie Therm 7.2., błąd równy, co do wartości końcowej wyniku nie więcej niż 2,0 %. Nie analizowano wpływu parametrów siatki MES, na rzeczywisty błąd obliczeniowy, przyjmując, iż będzie on taki sam dla wszystkich rozpatrywanych przypadków. Dla materiałów o niskim współczynniku przewodzenia ciepła  $\lambda$  [W/mK] i wysokim oporze cieplnym  $R > 5$  [m²K/W], błąd ten może mieć pewne znaczenia na wynik końcowy. Działanie takie zostanie wykonane przy kolejnych dokładniejszych obliczeniach. Zdaniem autorów, małe znaczenie na liczbowy wynik obliczeń ma sam proces przygotowania modelu geometrycznego i niedokładności obliczeń z tym związane.

W analizach wstępnych, które przedstawia prezentowany referat, nie uwzględniono sprzężonych zjawisk cieplno-wilgotnościowych, skupiając się głównie na obliczeniach cieplnych. Obliczenia pomijają możliwości zmian parametrów cieplnych powietrza wypełniającego kanały zakładając, iż dla wszystkich rozpatrywanych przypadków założono takie same warunki brzegowe III - go rodzaju.

Celem autorów jest opracowanie modelu płyty z taką konfiguracją i kształtem kanałów, dla którego proporcje kosztów wytworzenia do oporu cieplnego będą optymalne, a w założeniu niższe niż dla płyty pełnej. Projektowane w płycie kanały mają służyć zmniejszeniu ciężaru płyty i ograniczeniu zużycia materiału do jej wykonania. Autorzy rozważają możliwość zróżnicowania emisyjności powierzchni materiału osnowy otaczającej kanały, co powinno korzystnie wpłynąć, na jakość cieplną płyty.

Związane jest to jednak z możliwościami technologicznymi wytworzenia takich parametrów na powierzchni wewnętrznej kanałów. Działania takie nie były jednak przedmiotem prezentowanych analiz i obliczeń. Zastosowanie płyt kanałowych o odpowiedniej grubości pozwoli na obniżenie kosztów ponoszonych na ogrzewanie, z jednoczesnym obniżeniem ciężaru i kosztów wytwarzania płyt termoizolacyjnych. Zaprezentowane obliczenia są pierwszym etapem prac zmierzających do uzyskania płyt termoizolacyjnych, które mogą być wykorzystane do zabudowy od strony zewnętrznej w technologii etics (*external thermal insulation composite system*). Innowacyjne podejście do stworzenia płyt z zaprojektowanymi imperfekcjami jest chronione zgłoszeniem patentowym nr Wp. 22285. Autorzy prezentując pomysł na nowy komponent budowlany oczekują również komentarzy, co do słuszności i celowości zastosowania takiej formy izolacji cieplnej. Uzyskane wyniki motywują autorów do dalszej analizy i weryfikacji przyjętego modelu przepływu w oparciu o badania laboratoryjne.

## DEFINING THERMAL CHARACTERISTICS FOR GEOMETRICALLY MODIFIED INSULATION MATERIALS

### Summary:

The article presents the first part of research intended to establish a new thermo-insulation plate that would be used for insulating walls externally by means of ETICS (External Thermal Insulation Composite System). The plate will be made of stiff insulating materials and modified geometrically by making tunnels of different configuration and holes shapes. These tunnels will serve to diminish the plate weight and reduce the amount of material necessary for its production. The aim of such analysis is to determine the nature of heat flow in a designed building component in conditions of low-temperature flow as well as designing a model of a plate with such a configuration and tunnel shape where the cost of making with reference to heat parameters ( $R$  – thermal resistance,  $TE$  thermal effectiveness) is optimal. Innovative approach to building plates with imperfections is protected by patent Wp. 22285.

### LITERATURA

1. Górzyński J.: *Przemysłowe izolacje cieplne*, Wydawnictwo Sorus S.C, Poznań 1996.
2. Griffith B., Turler D., Arasteh D.: *Optimizing the effective conductivity and cost of gas filled panel thermal insulations*, Proceedings of the 22nd



- International Thermal Conductivity Conference, Arizona State University, November 1993.
3. Kosny, J. and J.E. Christian: *The optimum use of insulation for concrete masonry block foundations*, Building Research Journal 2(2), November 1993.
  4. Kostowski E.: *Przepływ ciepła*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006.
  5. Orlik-Koźdoń B., Slusarek J.: *The process of heat and dampness movement In building Partitions*; Monography 292, The Silesian University of Technology 2010.
  6. Orlik B. Steidl T.: Analiza wpływu im perfekcji geometrii przekroju materiału termoizolacyjnego na jego parametry cieplne, Monografi, Wybrane zagadnienia budownictwa energooszczędnego, Politechnika Warszawska Płock 2014, str. 115-125.
  7. Pogorzelski J.A, Firkowicz –Pogorzelska K.: *Thermal resistance of air spacer with surface coated by low emissivity film*, Czasopismo Techniczne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej 2007.
  8. Sadik Kakac, Yaman Yener: *Convective heat transfer*, Second Edition, CRC Press 1995.
  9. Theodore L.Bergman, Adrienne S.Lavine, Frank P.Incropera, David P.Dewitt: *Fundamentals of heat and mass transfer*, Wiley and Sons 2007.
  10. Urban B.; Engelmann P.; Kossecka E. *Arranging Insulation for Better Thermal Resistance In Concrete and Masonry Wall Systems*, 9th Nordic Symposium on Building Physics – NBS 2011, Volum 3.
  11. Van Geem, M.G. *Thermal transmittance of concrete block walls with core insulation*, Journal of Thermal Insulation Vol. 9, January 1986.
  12. William J. Cavanaugh, Gregory C.Tocci; Joseph A. Willes: *Architectural Acoustic. Principles and Practice*, John&Sons, 2010.
  13. ETA-05/0061 Baunit open-Die KlimaFassade.
  14. www.durasystems: Durasteel Acoustic Absorption Panel
  15. www.envirotech-acoustic.com; Saund Absorption Wooden Perforated Acoustic Panel.
  16. www.muranoacoustic.com.eu: Murano Acoustic Panels – Wood by Gerald Hynes.
  17. Wzór patentowy Kanałowa płyta izolacyjna Wp.22285