

**POLITECHNIKA WROCŁAWSKA
INSTYTUT TECHNIKI CIEPLNEJ I MECHANIKI PŁYNÓW**

Raport serii **PREPRINTY** NR 11/2006

**MODELOWANIE MECHANIZMÓW PRZEKAZYWANIA CIEPŁA
PRZEZ KRIOGENICZNE IZOLACJE PRÓŻNIOWE**

Jarosław POLIŃSKI

Słowa kluczowe: kriogenika
próżnia
izolacja termiczna
wymiana ciepła
modelowanie matematyczne

Rozprawa doktorska
Promotor: dr hab. inż. Maciej Chorowski, prof. PWr.

Praca została zrealizowana w ramach grantu promotorskiego Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr 3 T10B 005 28, umowy o współpracy pomiędzy Wydziałem Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej i Europejską Organizacją Badań Jądrowych CERN w Genewie oraz w ramach umowy z Inter University Accelerator Center (Delhi, Indie)

WROCŁAW 2006

PODZIĘKOWANIA

Szczególne podziękowania za nieocenioną życzliwość, pomoc i wsparcie podczas pacy nad przygotowywaniem rozprawy doktorskiej składam promotorowi profesorowi Maciejowi Chorowskiemu.

Podziękowania za pomoc w traktacji przygotowań i w trakcie prowadzenia badań składam kolegom z firmy Kriosystem sp. z o.o. z Wrocławia, panom: Bogdanowi Adamowiczowi, Jackowi Bohdziewiczowi, Grzegorzowi Strychalskiemu, Józefowi Miozde oraz Jakubowi Węgrzynowi.

Dziękuję również rodzicom, rodzinie, narzeczonej i przyjaciołom za wsparcie podczas studiów doktoranckich.

Spis treści

Wykaz najważniejszych oznaczeń	5
1. Wprowadzenie.....	6
2. Izolacje cieplne stosowane w technice niskich temperatur	10
2.1. Mechanizmy przekazywania ciepła w izolacjach termicznych.....	10
2.1.1. Przewodzenie ciepła przez ciała stałe.	10
2.1.2. Przewodzenie ciepła przez gazy	12
2.1.3. Wymiana ciepła przez konwekcję.....	15
2.1.4. Wymiana ciepła przez promieniowanie.	15
2.2. Izolacje termiczne wypełnione gazem	17
2.2.1. Pianki izolacyjne	17
2.2.2. Izolacje proszkowe i wełniane wypełnione gazem	18
2.3. Próżniowe kriogeniczne izolacje termiczne	23
2.3.1. Izolacja próżniowa	24
2.3.2. Izolacje proszkowo - próżniowe	27
3. Cele, tezy i zakres pracy.....	33
4. Wielowarstwowa izolacja próżniowa.....	35
4.1. Dane pomiarowe strumieni ciepła przepływających przez wielowarstwowe izolacje próżniowe	38
4.1.1. Stanowiska do badania przepływów ciepła przez wielowarstwową izolację próżniową.	38
4.1.2. Wyniki pomiarów strumieni ciepła przenikających przez wielowarstwową izolację próżniową.....	41
4.2. Analiza przepływu ciepła przez wielowarstwową izolację próżniową.....	46
4.3. Modelowanie matematyczne przenikania ciepła przez wielowarstwową izolację próżniową.	52
4.3.1. Model matematyczny przenikania ciepła przez wielowarstwową izolację próżniową.	53
4.3.2. Wyniki modelowania	60
4.3.3. Różnice pomiędzy wynikami modelowania a wynikami pomiarów.....	69
5. Badania eksperymentalne.....	76
5.1. Cel i zakres badań eksperymentalnych	76
5.2. Kriostat badawczy	76

5.3.	Procedura i przebieg badań	78
5.4.	Wyniki pomiarów	84
5.4.1.	Strumień ciepła przenikający przez wielowarstwową izolację próżniową w zależności od ilości zastosowanych warstw ekranów radiacyjnych	84
5.4.2.	Strumień ciepła przenikający przez wielowarstwową izolację próżniową w zależności ciśnienia gazu w przestrzeni próżniowej	85
5.4.3.	Strumień ciepła przenikający przez wielowarstwową izolację próżniową w zależności od stopnia kompresji warstw izolacji	87
5.4.4.	Strumień ciepła przenikający przez wielowarstwową izolację próżniową w zależności od siły naciągu nawijanych warstw izolacji.	88
5.5.	Analiza wyników pomiarów.	89
5.5.1.	Wyznaczenie wartości emisyjności powierzchni ekranów radiacyjnych.....	90
5.5.2.	Wyznaczenie rozkładu i poziomu ciśnienia gazu rezydualnego.	91
5.5.3.	Wyznaczenie wartości przewodności cieplnej w miejscach kontaktu przekładki z przylegającymi ekranami radiacyjnymi.....	93
5.6.	Wnioski z przeprowadzonych badań i obliczeń	97
6.	Podsumowanie i wnioski wynikające z pracy.....	101
7.	Literatura	104
	Załącznik A – Zestawienie literaturowych danych pomiarowych strumienia ciepła przenikającego przez wielowarstwową izolację próżniową w zależności od jej parametrów	113
	Załącznik B – porównanie izolacji termicznych stosowanych w kriogenice.	118

Wykaz najważniejszych oznaczeń

- d_0 – średnia średnica cząsteczki gazu, m
 d – średnica cylindra, m
 D – współczynnik dyfuzji gazu, m^2/s
 F – powierzchnia, m^2
 g – grubość izolacji, m
 i – numer kolejnej warstwy
 j_v – objętościowy strumień gazu, W/m^3 , Pa/s
 k_B – stała Boltzmanna, J/K ($k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J}/\text{K}$)
 k_s – przewodnictwo ciepła przekładki, $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
 l – długość czynna powierzchni cylindrycznej, m
 l_0 – droga swobodna gazu, m
 L – odległość między powierzchniami wymieniającymi ciepło, m
 M_0 – masa cząsteczkowa gazu, kg/kmol
 n – współczynnik załamania promieniowania
 N – ilość warstw
 $\bar{N}$ – stopień kompresji warstw, warstw/cm
 N_a – liczba Avogadra ($N_a = 6,022 \cdot 10^{26} \text{ 1}/\text{kmol}$)
 $\dot{q}$ – powierzchniowy strumień ciepła, W/m^2
 $\dot{q}_v$ – strumień objętości gazu, m^3/s
 $\dot{Q}$ – strumień ciepła, W
 p – ciśnienie gazu, Pa
 r – ciepło parowania, J/kg
 R_u – uniwersalna stała gazowa, $\text{J}/\text{kmol}\cdot\text{K}$ ($R_u = 8134,7 \text{ J}/\text{kmol}\cdot\text{K}$)
 T – temperatura, K
 $\dot{W}$ – moc urządzeń, W
- α – współczynnik akomodacji
 δ – grubość przekładki, m
 ε – emisyjność powierzchni
 κ – wykładnik adiabaty
 λ – współczynnik przewodzenia ciepła, $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$
 ρ – gęstość, kg/m^3
 σ – stała promieniowania ciała doskonale czarnego, $\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$ ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\text{K}^4$)

1. Wprowadzenie

Kriogenika (z greckiego *kryos* – mróz, zimno i *genes* – pochodzić) zajmuje się metodami wytwarzania i wykorzystywania temperatur poniżej 120 K. XIII Międzynarodowy Kongres Chłodziarstwa w 1971 roku uznał temperaturę 120 K za umowną granicę oddzielającą kriogenikę od chłodziarstwa. Za czynniki kriogeniczne (kriogeny) uważa się te skroplone gazy, których normalna temperatura wrzenia jest niższa od 120 K [46]. Właściwości cieczy kriogenicznych przedstawia Tabela 1-1 [110].

Początki kriogeniki sięgają końca XIX wieku, kiedy to w 1877 roku Szwajcar Cailletet i Francuz Pictet przez realizację procesu ekspansji sprężonego tlenu krótkotrwale uzyskali temperaturę około 90 K. Rok później, ci sami naukowcy wykorzystując tą samą metodę i posługując się azotem osiągnęli temperaturę bliską 77.3 K.

Prawdziwym przełomem w rozwoju kriogeniki było osiągnięcie polskich naukowców Karola Wróblewskiego i Zygmunta Olszewskiego, którzy w latach 1883 – 1885 skroplili powietrze i jego składniki: tlen i azot. Dzięki temu pierwszy raz otrzymano stabilne temperatury, najpierw 90 K a następnie 77.3 K. Podobnie jak Cailletet i Pictet zastosowali oni metodę ekspansji sprężonego gazu ochłodzonego za pomocą metanolu wrzącego pod obniżonym ciśnieniem.

Ważnym wydarzeniem w rozwoju kriogeniki stało się wynalezienie przez Jamesa Dewara w 1892 roku naczynia do przechowywania cieczy kriogenicznych. W celu termicznej izolacji naczynia Dewar wytworzył próżnię pomiędzy jego podwójnymi ściankami. Wykorzystanie zjawiska bardzo niskiego przewodnictwa cieplnego silnie rozrzedzonych gazów umożliwiło wytworzenie wysoko efektywnych kriogenicznych izolacji termicznych. Wynalazek Dewara pozwolił na długotrwałe przechowywanie skroplonych gazów, dzięki czemu pod koniec XIX i na początku XX w. nastąpił duży rozwój produkcji i transportu gazów w postaci skroplonej [46].

Tabela 1-1 Właściwości cieczy kriogenicznych [110].

Ciecz	M [g]	T _N [K]	ρ ₁ [kg/m ³]	ρ ₂ [kg/m ³]	ρ ₃ [kg/m ³]	T _C [K]	p _C [MPa]	Δh [kJ/kg]	v ₂ /v ₁ –	v ₃ /v ₁ –	ΔV Wl/doba
He	4,003	4,2	124,9	16,9	0,178	5,2	0,229	20,3	7,4	701	34,08
H₂	2,016	20,3	70,8	1,34	0,089	33,0	1,29	446,0	52,8	788	2,74
D (deuter)	4,028	23,6	161	2,30	0,179	38,3	1,65	305,0	70,0	899	1,76
T (tryt)	6,032	25,0	257	3,14	0,269	40,4	1,85	231,0	81,8	955	1,46
Ne	20,18	27,1	1207	9,58	0,90	44,5	2,73	85,8	126,0	1341	0,83
N₂	28,01	77,3	808	4,62	1,25	126,2	3,39	199,0	175,0	646	0,54
Pow.*	28,96	78,8	874	---	1,29	132,6	3,77	205,0	---	678	0,48
CO	28,01	91,6	790	4,50	1,25	132,9	3,50	216,0	176,0	632	0,51
F	37,99	85,0	1502	5,63	1,70	144,3	5,22	175,0	267,0	883	0,33
Ar	39,95	87,3	1395	5,77	1,79	150,9	4,90	163,0	242,0	779	0,38
O₂	32,00	90,2	1140	4,47	1,43	154,6	5,04	213,0	255,0	797	0,36
CH₄	16,04	111,6	423	1,82	0,717	190,5	4,60	510,0	232,0	590	0,40

Znaczenie symboli: M – masa cząsteczkowa, T_N – normalna temperatura wrzenia przy p=1ata, Δh – ciepło parowania, ΔV – ubytek objętości cieczy przy dopływie ciepła, ρ – gęstość, v-objętość właściwa, T_C – temperatura krytyczna, p_C – ciśnienie krytyczne.

Indeksy: 1-ciecz w T_N, 2-gaz w T_N, 3-gaz przy 1 ata i 0°C, c – w punkcie krytycznym, * - powietrze.

Naczynie Dewara pozwoliło Kamerlinghowi Onnesowi w 1908 roku na skroplenie helu, a następnie na odkrycie w 1911 roku nadprzewodnictwa w rtęci. Wydarzenie to w dużym stopniu przyczyniło się do rozwoju kriogeniki helowej i technologii z nią związanych [108].

Najważniejszymi cechami skroplonych gazów jest ich bardzo niska normalna temperatura wrzenia oraz ich bardzo mała objętość właściwa w stosunku do objętość właściwej w warunkach normalnych ($p=1$ ata, $t=0$ °C).

Dzięki niskiej temperaturze wrzenia czynniki kriogeniczne wykorzystuje się do ochładzania i przechowania ciał w bardzo niskiej temperaturze. W tym obszarze zastosowań używa się skroplonego helu i azotu. Czynniki te są niewybuchowe, niepalne, nietoksyczne oraz nie są aktywne chemicznie. Skroplony hel charakteryzuje się najniższą, spośród cieczy kriogenicznych, normalną temperaturę wrzenia (4,2 K) i równocześnie nie posiada punktu potrójnego, dzięki czemu, przez obniżanie ciśnienia par nad zwierciadłem cieczy technicznie możliwe jest otrzymanie skroplonego helu o temperaturze niższej od 1 K [108]. Z tego względu czynnik ten stosowany jest w procesach wymagających ekstremalnie niskich temperatur np. do kriostatowania nadprzewodników niskotemperaturowych czy też w badaniach naukowych prowadzonych w bardzo niskich temperaturach. Natomiast w procesach wymagających jedynie głębokiego mrożenia, takich jak: szybkie zamrażanie żywności, długotrwałe przechowywanie materiałów biologicznych, metalurgii (obróbka podzerowa) czy w kriochirurgii (do usuwania tkanek przez ich wymrażanie) zastosowanie znalazł znacznie tańszy i łatwiejszy w posługiwaniu się skroplony azot.

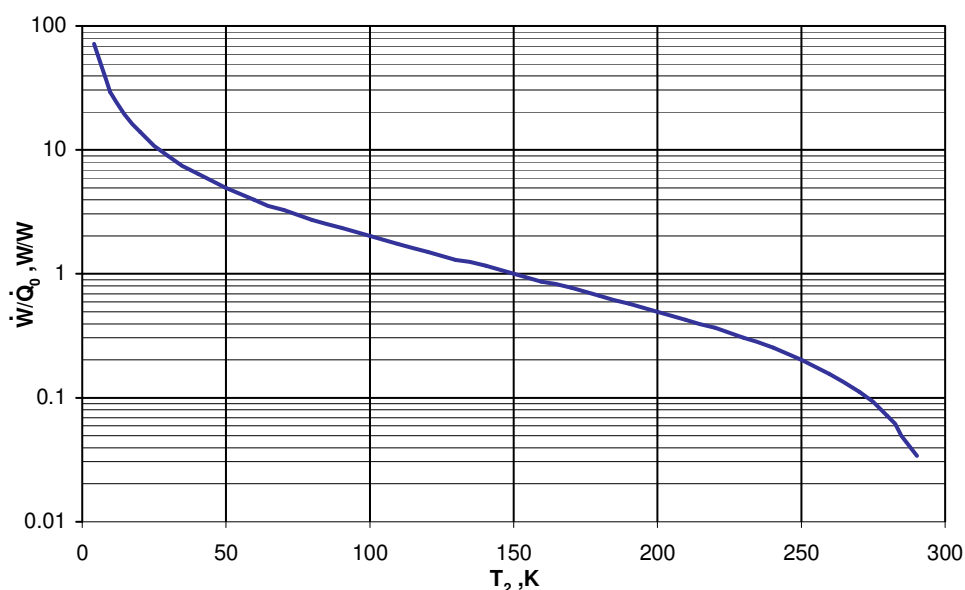
Bardzo duży stosunek objętości właściwej gazów w stanie normalnym do ich objętości właściwej w stanie skroplonym, który, w zależności od rodzaju gazu, waha się od niespełna 600 dla metanu do nawet 1341 dla neonu, pozwala na przechowywanie i transport dużych ilości gazów w stosunkowo niewielkich objętościach. Rozwiązania takie stosuje się szczególnie w przemyśle chemicznym, hutnictwie, metalurgii czy też medycynie.

Ze względu na niskie temperatury kriogenów, w technice kriogenicznej mamy do czynienia z dużymi różnicami temperatur pomiędzy otoczeniem a elementami urządzeń i instalacji kriogenicznych zawierający skroplone gazy. Różnice te mogą wynosić od 190 K do prawie 300 K dla skroplonego helu. Przy braku stosowania odpowiednio skutecznych izolacji termicznych tak duże różnice temperatur mogą generować bardzo duże dopływy ciepła powodujące, w najlepszym przypadku, znaczne straty czynników znajdujących się w instalacjach kriogenicznych, a w najgorszym, szybki wzrost ciśnienia wewnątrz tych instalacji mogący doprowadzić do ich eksplozji [26]. Wysokoefektywne izolacje termiczne są niezbędne do przeprowadzania większości procesów kriogenicznych takich jak skraplanie gazów czy też ich rektyfikacji metodami kriogenicznymi [15]. Nadmierny dopływ ciepła do cieczy kriogenicznych stanowi również duże zagrożenia dla zdrowia i życia osób przebywających w pobliżu urządzeń lub instalacji kriogenicznych.

W celu utrzymania niskotemperaturowych elementów instalacji kriogenicznych na stałym poziomie temperatury należy kompensować ciepło dopływające do nich z otoczenia przez wykorzystanie urządzenia realizującego lewobieżny obieg termodynamiczny (chłodziarki). Jeżeli za T_2 przyjmiemy temperaturę elementu kriostatowanego, za T_1 temperaturę otoczenia a za $\dot{Q}_0$ ciepło przenikające przez izolację termiczną to, w świetle II Zasady Termodynamiki, minimalna moc $\dot{W}$ idealnej chłodziarki służącej do kompensacji ciepła $\dot{Q}_0$ określona jest zależnością (1.1):

$$\dot{W} = \dot{Q}_0 \frac{T_1 - T_2}{T_2} \quad (1.1)$$

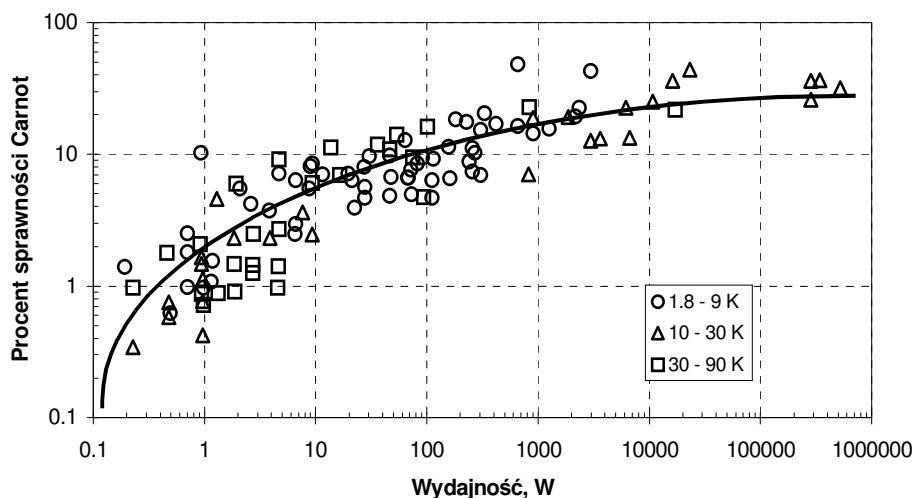
Na Rysunku 1.1 pokazano jednostkową względną moc $\dot{W}/\dot{Q}_0$ w funkcji temperatury kriostatowania T_2 wyznaczoną dla temperatury otoczenia $T_1 = 300$ K.



Rysunek 1.1. Minimalna względna moc $\dot{W}/\dot{Q}_0$ konieczna do kompensacji ciepła przenikającego przez izolację w funkcji temperatury kriostatowania T_2 , dla temperatury otoczenia $T_1=300$ K

Zwróćmy uwagę, że dla przyjętej temperatury otoczenia $T_1 = 300$ K, jeżeli temperatura kriostatowania T_2 jest wyższa od 150 K, to minimalna moc chłodziarki $\dot{W}$ jest mniejsza od strumienia ciepła $\dot{Q}_0$. W zakresie temperatur chłodniczych (ok. 250 K) moc chłodziarki stanowi ona niespełna 20% strumienia ciepła $\dot{Q}_0$. Natomiast, dla temperatur kriostatowania T_2 niższych od 150 K, moc chłodziarki staje się większa od strumienia ciepła $\dot{Q}_0$, a istotnie wzrasta w zakresie temperatur bliskich zero bezwzględnemu. Dla przykładu: przy kriostatowaniu ciał na poziomie temperatury skroplonego azotu 77.3 K każdy doprowadzony 1 W ciepła musi być kompensowany pracą chłodziarki o mocy wynoszącej co najmniej 2.9 W, na poziomie temperatury skroplonego helu (4.2 K) niezbędna moc chłodziarki wynosić już ponad 70 W, a dla temperatury 1.8 K, a więc takiej, w jakiej mają być kriostatowane cewki magnesów w akceleratorze obecnie budowanym w CERN w Szwajcarii, chłodziarka musi rozwinąć moc 165 W. Należy podkreślić, że przedstawiona analiza odnosi się do przypadku, w którym chłodziarka jest urządzeniem idealnym (wszystkie przemiany zachodzące w chłodzarce pozbawione są strat), a więc wykazuje 100% sprawności obiegu Carnot. Strobridge[104] zaprezentował dane dotyczące efektywności pracy kilkudziesięciu systemów kriogenicznych różniących się między sobą wydajnością (od 0,2 W do 600kW) oraz temperaturą kriostatowania (od 1.8 K do 90 K). Wyniki analizy Strobridgea, przedstawione na Rysunku 1.2, pokazują, że efektywność pracy systemów kriogenicznych w zasadzie nie zależy od ich temperatur kriostatowania lecz od ich mocy chłodniczej. Duże systemy kriogeniczne w większości przypadków pracują z efektywnością nieprzekraczającą 40% efektywności urządzenia idealnego. W przypadku systemów średnie i małej mocy efektywność ich pracy wynosi jedynie od 1% do 20 % efektywności obiegu Carnot. Oznacza to, że w przypadku rzeczywistych chłodziarek stosowanych do kriostatowania ciał na poziomie temperatur kriogenicznych nakłady pracy na kompensowanie dopływów ciepła z otoczenia mogą być od 2.5 do ponad 100 razy większe w porównaniu z chłodziarkami

idealnymi. Oczywiście, zatem, staje się, że ograniczenie kosztów pracy systemów kriogenicznych wiąże się z koniecznością stosowania wysokoefektywnych izolacji termicznych.



Rysunek 1.2 Rzeczywista sprawność urządzeń kriogenicznych [104]

Innym ważnym powodem warunkującym stosowanie w kriogenice wysokoefektywnych izolacji termicznych jest konieczność ograniczenia odparowania niektórych czynników kriogenicznych. Szybkie odparowywanie gazów takich jak fluor, metan, tlen czy wodór przechowywanych w stanie skroplonym w warunkach niedostatecznie dobrej izolacji może być źródłem zagrożenia zdrowia i życia osób przebywających w pobliżu miejsca składowania tych gazów [46]. Również pozyskiwanie niektórych gazów, takich jak hel, argon, deuter, tryt czy neon związane jest z wysokim nakładem finansowym. Dlatego też ekonomicznie uzasadnione jest dążenie do możliwie największego ograniczenia odparowania takich czynników kriogenicznych.

W chwili obecnej rozwój techniki kriogenicznej w Polsce związany jest z transportem i przechowywaniem gazu ziemnego na potrzeby energetyczne kraju. Koncepcja eksportu gazu ziemnego z Norwegii wymaga budowy gazoportu do odbioru, oraz rozległej infrastruktury do dystrybucji gazu ziemnego w postaci skroplonej. Rozwój kriotechniki, zarówno w Polsce, jak i na świecie, upatrywany jest również w możliwość napędzania silników spalinowych wodorem oraz wykorzystaniem wodorowych ogniw paliwowych do napędu pojazdów samochodowych. Pierwsze prototypy samochodów opartych o takie napędy wyposażone są w zbiorniki do przechowywania wodoru w postaci skroplonej. Rozwój tych technologii wymaga nie tylko budowy zbiorników kriogenicznych instalowanych w pojazdach mechanicznych, ale, jeżeli nie przede wszystkim, budowy instalacji do napełniania i szerokiej sieci dystrybucji paliwa w postaci skroplonego wodoru.

2. Izolacje cieplne stosowane w technice niskich temperatur

2.1. Mechanizmy przekazywania ciepła w izolacjach termicznych

Wymiana ciepła pomiędzy dwoma ciałami o różnych temperaturach następuje w wyniku takich mechanizmów fizycznych jak: przewodzenie, konwekcja oraz promieniowanie. Zadaniem izolacji termicznych stosowanych w technice jest zablokowanie wymiany ciepła pomiędzy ciałami oddzielonymi taką izolacją. Opracowanie skutecznych izolacji termicznych wymaga przeanalizowania wymienionych zjawisk pod kątem określenia sposobów ograniczenia przepływów ciepła.

2.1.1. Przewodzenie ciepła przez ciała stałe.

Zagadnienie jednowymiarowego przewodzenia ciepła przez ciało o przekroju F wzdłuż osi x prostopadłej do powierzchni F jest opisane przez równanie wynikające z prawa Fouriera [7, 61, 112]:

$$\dot{Q} = -\lambda_s F \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

gdzie F jest powierzchnią [m^2], λ_s współczynnikiem przewodzenia ciepła przez ciało stałe [$\text{W/m}\cdot\text{K}$]. W warunkach, kiedy: $F = \text{const}$ oraz $\lambda_s = \text{const}$, zachodzących np. dla pręta o długości L oraz temperaturach T_1 i T_2 na obu końcach ($T_1 > T_2$), po scałkowaniu równania (2.1) otrzymuje się:

$$q_s = \frac{\lambda_s}{L} \cdot (T_1 - T_2) \quad (2.2)$$

gdzie:

$$q_s = \frac{\dot{Q}}{F} \quad (2.3)$$

jest powierzchniowym strumieniem ciepła [W/m^2].

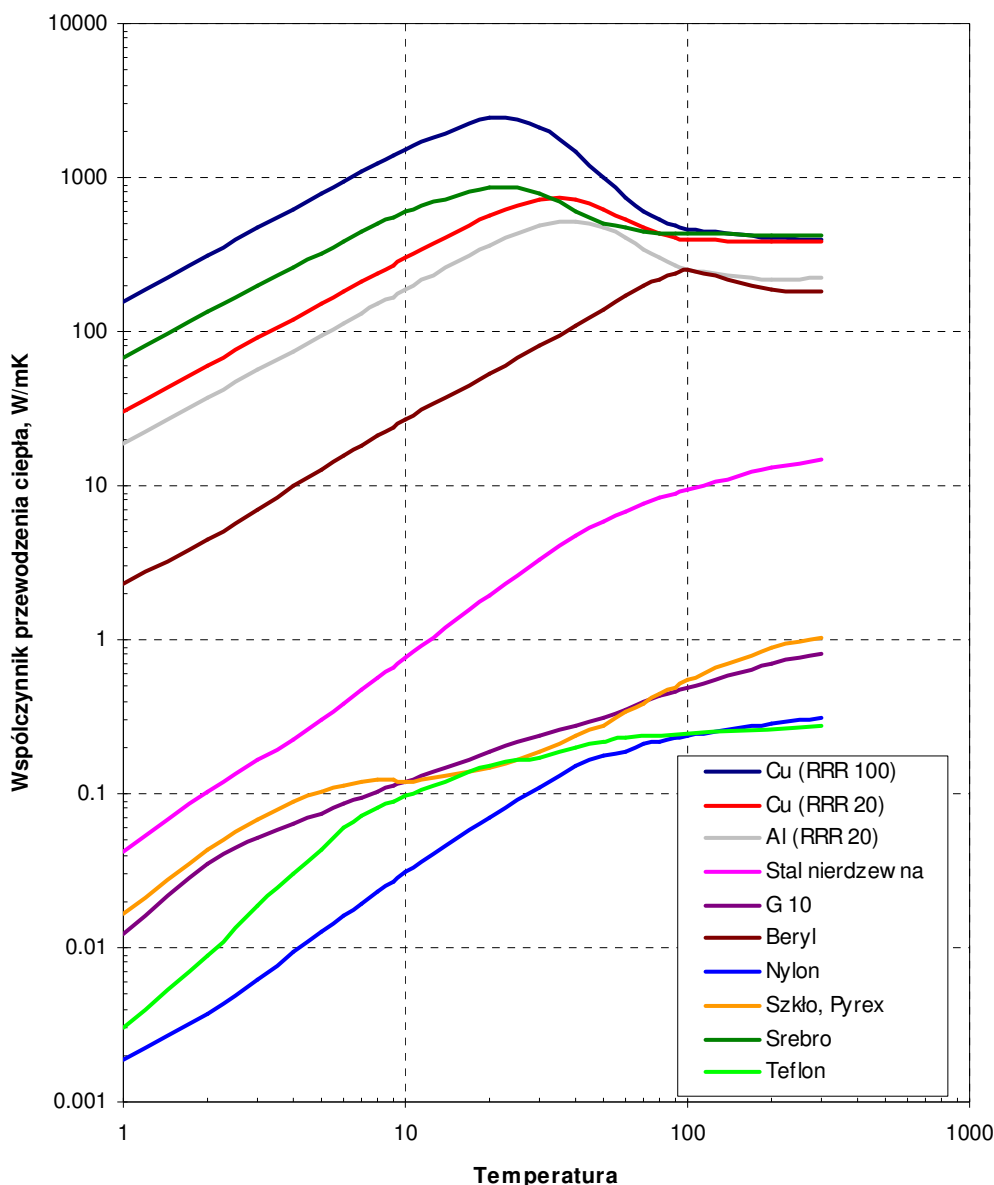
W konstrukcjach urządzeń kriogenicznych obniżenie strumienia przewodzonego ciepła uzyskuje się przez wydłużenie długości L , redukcję przekrojów F oraz dobór odpowiednich materiałów. Powoduje to charakterystyczny kształt kriostatów budowanych z reguły w postaci osiowosymetrycznej, wewnętrznych naczyń wykonanych z rur cienkościennych, z wykorzystaniem stali nierdzewnej i obecnie coraz częściej materiałów kompozytowych.

Przewodzenie ciepła przez ciała stałe odbywa się w wyniku przekazywania energii drgań atomów w sieci krystalicznej o kwantach energii zwanych fononami oraz w wyniku ruchu elektronów swobodnych [112]:

$$\lambda_s = \lambda_f + \lambda_e \quad (2.4)$$

gdzie λ_f – fononowy i λ_e – elektronowy współczynnik przewodzenia ciepła.

W metalach ciepło przewodzone jest głównie przez elektrony swobodne natomiast w materiałach izolacyjnych, przy obecności bardzo małej ilości elektronów swobodnych, głównie przez fonony. Wpływ zarówno na fononowe i elektronowe przewodnictwo cieplne metali ma ilość zawartych w nich domieszek i zanieczyszczeń, technologia ich wytwarzania, obróbka cieplna i mechaniczna oraz budowa krystaliczna. Z tych względów literaturowe wartości współczynników przewodzenia ciepła metali mogą się bardzo od siebie różnić [112]. W przypadku materiałów izolacyjnych wpływ zanieczyszczeń przewodnictwo cieplne w zasadzie nie jest istotny.



Rysunek 2.1 Współczynniki przewodzenia ciepła ciał stałych najczęściej używanych w technice kriogenicznej [110]

Współczynnik przewodzenia ciepła ciał stałych jest silną funkcją temperatury. Wraz ze spadkiem temperatury w ciałach stałych następuje zahamowywanie drgań struktury krystalicznej, przez co zanika udział mechanizmu fononowego przewodzenia ciepła. Równocześnie ulega wzmożeniu ruch elektronów swobodnych, które przy wyższych temperaturach hamowane są na skutek kolizji z drgającą siecią krystaliczną. Zjawisko to jest

często wykorzystane do określania czystości niektórych metali przez pomiar ich oporu elektrycznego w temperaturach kriogenicznych, najczęściej w temperaturze wrzenia helu 4.2 K [108].

Na Rysunku 2.1 przedstawiono współczynnik przewodzenia ciepła ciał stałych najczęściej używanych w technice kriogenicznej [110].

2.1.2. Przewodzenie ciepła przez gazy

Zgodnie z kinetyczną teorią gazów przewodzenie ciepła przez gaz odbywa się w wyniku wymiany energii kinetycznej cząsteczek lub atomów gazu z innym ciałem. Bardzo istotnym czynnikiem wpływającym na ten proces jest ciśnienie gazu, wynikające z ilości molekuł gazu w rozpatrywanej objętości oraz ich pędu. Rozpatrzmy przypadek wymiany ciepła przez gaz pomiędzy dwoma powierzchniami o różnych temperaturach: cząsteczka gazu przylegająca do jednej z powierzchni przyjmuje część energii drgań otrzymując odpowiednią prędkość. Następnie cząsteczka przekazuje energię pierwszemu napotkanemu ciału. W zależności od ciśnienia gazu, ciałem tym może być inna cząsteczka lub przeciwległa powierzchnia.

Przy wysokich ciśnieniach cząsteczka gazu, która przylegała do rozpatrywanej powierzchni, odda energię mechaniczną innej cząsteczce gazu a ta następnej. Na skutek wielokrotnych wzajemnych zderzeń cząsteczek gazu energia cieplna zostanie przetransportowana do przeciwległej powierzchni. Taki przebieg przekazywania ciepła określa się mianem *warunków lepkich przekazywania ciepła* [54, 57].

W przypadku bardzo niskich ciśnień cząsteczka oderwana od jednej powierzchni bez przeszkód dociera do powierzchni przeciwległej. Są to *warunki molekularne przekazywania ciepła* [54, 57].

Dla ciśnień pośrednich przekazywanie energii pomiędzy rozpatrywanymi powierzchniami następuje zarówno w wyniku wielokrotnych kolizji cząsteczek gazu jak i bezpośrednim przekazywaniu energii kinetycznej cząsteczek między powierzchniami. Są to tzw. *pośrednie warunki przekazywania ciepła* [54, 57].

Warunki, w jakich zachodzi zjawisko wymiany ciepła przez gaz, można określić za pomocą bezwymiarowej liczby Knudsen K , będącej stosunkiem odległości między rozpatrywanymi powierzchniami L i wielkości drogi swobodnej gazu l_0 . Dla $K \gg 1$ zachodzą warunki lepkie, $K \ll 1$ zachodzą warunki molekularne, $K \approx 1$ zachodzą warunki pośrednie [54, 57].

Ogólną zależność określającą strumień ciepła przewodzonego przez gaz można przedstawić następująco[54]:

$$q_g = \lambda_g \frac{1}{L + l_0} (T_1 - T_2), \quad (2.5)$$

gdzie λ_g jest współczynnikiem przewodzenia ciepła gazu [W/m·K], L odległością pomiędzy powierzchniami wymieniającymi ciepło[m] a l_0 drogą swobodną gazu [m]

Współczynnik przewodzenia ciepła przez gaz określa następująca zależność [54]:

$$\lambda_g = \frac{1}{N_a \cdot d_0^2} \left(\frac{R_u}{\pi} \right)^{1.5} \frac{9\kappa - 5}{4(\kappa - 1)} \left(\frac{T_0}{M_0} \right)^{0.5}, \quad (2.6)$$

gdzie N_a jest liczba Avogadra [1/kmol] ($N_a=6,022 \cdot 10^{26}$ 1/kmol), d_0 jest średnią średnicą cząstek gazu [m], R_u uniwersalną stałą gazową [J/kmol·K] ($R_u=8134,7$ J/kmol·K),

κ wykładnikiem adiabaty gazu, T_0 średnią temperaturą gazu [K] i M_0 masą molową gazu [kg/kmol].

Drogę swobodną gazu można wyznaczyć z zależności [54]:

$$l_0 = \frac{9\kappa - 5}{\kappa + 1} \frac{2 - \alpha}{\alpha} \frac{k_B}{\pi \sqrt{2} d_0^2} \frac{T_0}{p} \quad (2.7)$$

w której α jest średnim współczynnikiem akomodacji gazu na powierzchniach ciała stałego, k_B jest stałą Boltzmanna [J/K] ($k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K) a p jest ciśnieniem gazu [Pa].

Wartości podstawowych parametrów związanych z przewodzeniem ciepła dla niektórych gazów przedstawiono w Tabeli 2-1 [54].

Tabela 2-1 Wartości podstawowych parametrów związanych z przewodzeniem ciepła dla niektórych gazów [54].

	M_0 kg/mol	d_0 nm	l_0 (273K, 1ata) nm	κ –	λ (273K, 1ata) mW/mK
He	4	0.22	176	1.667	144
H₂	2	0.27	117	1.4	174
N₂	28	0.38	59.3	1.4	23.6
Powietrze	29	0.375	60.6	1.4	24.1
H₂O	18	0.465	39.5	1.33	21.0

M_0 – masa molowa gazu, d_0 – średnia średnica cząstek gazu, l_0 – droga swobodna gazu, κ – wykładnikiem adiabaty gazu, λ – współczynnik przewodzenia ciepła gazu

Współczynnik akomodacji we wzorze (2.7) określa zdolność cząsteczki gazu do odbierania energii drgań ciała stałego. Jeżeli $\alpha=1$, to cząsteczka wybita z powierzchni ciała stałego uzyska energię kinetyczną odpowiadającą dokładnie temperaturze tej powierzchni, zgodnie z zależnością podaną przez Boltzmanna zachodzi: $E_k \approx k_B T$. Dla mniejszych wartości współczynnika akomodacji prędkość ta będzie odpowiednio mniejsza. Trudno jest jednoznacznie określić wartość współczynnika akomodacji, ponieważ zależy ona od wielu parametrów takich jak rodzaj materiału i stan (zabrudzenia, chropowatość) powierzchni a przede wszystkim od gazu oraz temperatury. Poniżej w Tabeli 2-2 przedstawiono orientacyjne wartości współczynnika akomodacji gazów najczęściej stosowanych w kriogenice [30]:

Tabela 2-2 Orientacyjne wartości współczynnika akomodacji gazów w zależności od temperatury [30]

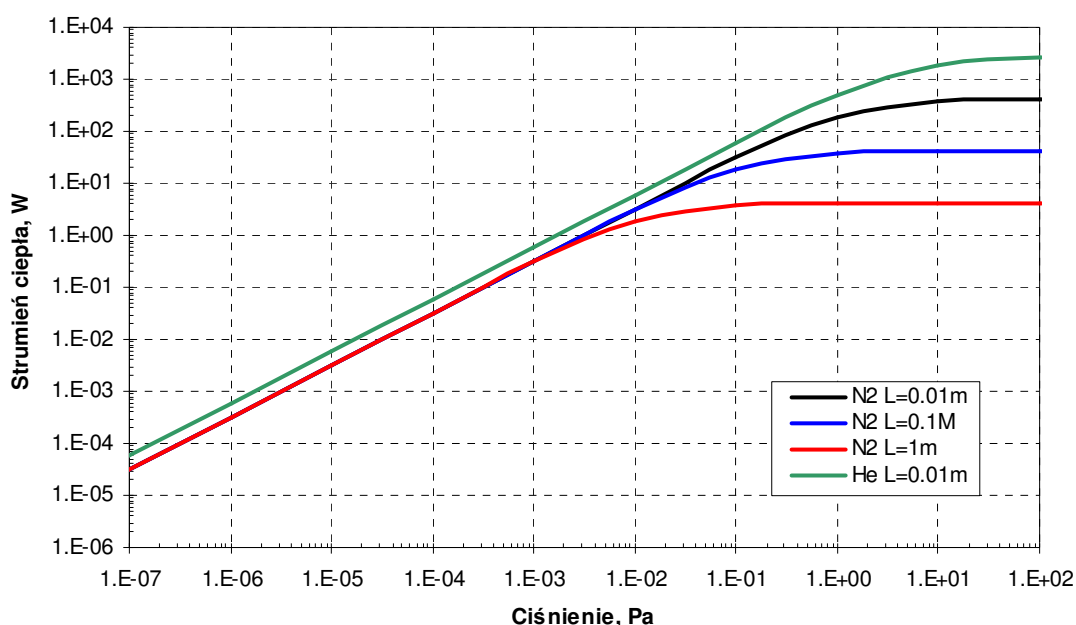
Rodzaj gazu Temperatura	Hel	Wodór	Powietrze/ azot
300 K	0.3	0.3	0.8
77.3 K	0.4	0.5	1
20.4 K	0.6	1	1
4.2 K	1	1	1

W warunkach lepkich, czyli gdy $L \gg l_0$, w mianowniku równania (2.5) wartość drogi swobodnej l_0 można pominąć przez co wyrażenie na przewodzenie ciepła przez gaz w warunkach lepkich ma postać identyczną jak równanie (2.2) o współczynniku przewodzenia ciepła określonym równaniem (2.6).

W przypadku molekularnych warunków przewodzenia ciepła przez gaz ($L \ll l_0$) wartość L w mianowniku równania (2.5) może być pominięta. Podstawiając odpowiednio wyrażenie (2.6) i (2.7) oraz, po uwzględnieniu, że $R_u = k_B \cdot N_a$, otrzymuje się zależność na ilość ciepła przewodzonego przez gaz w warunkach molekularnych [54]:

$$q_g = \left(\frac{R_u}{8\pi T_0 M_0} \right)^{0.5} \frac{\kappa + 1}{\kappa - 1} \frac{\alpha}{2 - \alpha} p \cdot (T_1 - T_2) \quad (2.8)$$

Na Rysunku 2.2 przedstawiono wartości strumień ciepła przewodzonego przez gaz w zależności od ciśnienia gazu przy różnych odległościach pomiędzy izolowanymi powierzchniami L dla N_2 i He przy temperaturze obu powierzchni $300 - 77.3$ K.



Rysunek 2.2 Strumień ciepła przewodzonego przez gaz w zależności od ciśnienia gazu przy różnych odległościach pomiędzy izolowanymi powierzchniami L . Wartości dla N_2 i He przy temperaturze obu powierzchni $300 - 77.3$ K.

Jak wynika z zależności (2.6) i Tabeli 2-1 ilość ciepła przewodzonego przez gaz w warunkach lepkich zależy jedynie od rodzaju gazu (średnicy cząsteczki, wykładnika adiabaty i masy molowej) oraz jego temperatury. Zatem ograniczenie przewodzenia ciepła gazu w warunkach lepkich wiąże się z zastosowaniem gazów ciężkich o dużych średnicach cząsteczek.

W przypadku przewodzenia ciepła przez gazy mocno rozrzedzone (warunki molekularne), obok stosunkowo niewielkiego wpływu rodzaju gazu, największe znaczenie na ilość transportowanego ciepła przez gaz ma ciśnienie gazu. Z zależności (2.8) oraz rysunku 2.2 wynika, że ilość ciepła przekazywanego w takich warunkach jest wprost proporcjonalna do ciśnienia gazu, przy czym w zależności od odległości między izolowanymi powierzchniami przejście z warunków lepkich do warunków molekularnych odbywa się w innym zakresie

ciśnien. W praktyce kriogenicznej, ograniczanie przewodzenia ciepła przez gaz wiąże się obniżaniem ciśnienia gazu do poziomu niższego od 0.1 Pa [92].

2.1.3. Wymiana ciepła przez konwekcję.

Na ogół przewodzenie ciepła w płynach połączone jest z konwekcją, czyli z makroskopowym ruchem płynu. W zależności od mechanizmów powstania ruchu płynu wyróżnia się konwekcję swobodną, podczas której ruch następuje w wyniku oddziaływania zewnętrznych sił masowych na część płynu o różnych temperaturach (gęstościach), oraz konwekcję wymuszoną za pomocą urządzeń technicznych. np. dmuchaw, wentylatorów, pomp, mieszadeł czy też sprężarek. Ponieważ w technice cieplnej konwekcja wymuszona ma na celu intensyfikację wymiany ciepła pomiędzy płynami a ciałami stałymi, przy rozpatrywaniu mechanizmów przenikania ciepła przez izolacje termiczne analizie poddaje się jedynie konwekcję swobodną [46].

Wartości współczynnika przejmowania ciepła przy konwekcji swobodnej w ogólnym przypadku zależą od liczby *Grashofa*, która jest proporcjonalna do trzeciej potęgi charakterystycznego wymiaru liniowego. Z tego względu jednym ze sposobów eliminacji konwekcji cieplnej gazów jest ograniczanie długości charakterystycznego wymiaru liniowego przez stosowanie przegród uniemożliwiających rozwinięcie się konwekcyjnych ruchów gazów. Materiały porowate, włókniste czy też ziarniste są przykładem technicznej realizacji takich przegród [7, 46, 110].

Konwekcję gazów można całkowicie wyeliminować również poprzez bardzo silne obniżenie ciśnienia, aż do wytworzenia próżni. Cząstki gazu znajdującego się w warunkach molekularnych nie oddziałują między sobą, a więc w tych warunkach nie istnieje mechanizm odpowiedzialny za konwekcję swobodną gazu, tak jak ma to miejsce w przypadku warunków lepkich [54, 57].

2.1.4. Wymiana ciepła przez promieniowanie.

W ujęciu fenomenologicznym promieniowanie ciepła jest skutkiem przemiany energii wewnętrznej ciała o temperaturze wyższej od zera bezwzględnego w energię promieniowania, emitowaną na zewnątrz ciała w postaci fal elektromagnetycznych. Jeżeli emitowana energia dotrze do powierzchni innego ciała to jest w części lub całkowicie pochłaniana i zamieniana na energię wewnętrzną. Wymiana ciepła przez promieniowania nie wymaga kontaktu ciał i może odbywać się poprzez próżnię. W ujęciu statystycznym promieniowanie ciepła jest emisją fotonów opuszczających wzbudzone atomy, które następnie docierają do innych atomów powodując ich wzbudzenie [112].

Promieniowanie cieplne obejmuje fale o długościach 0.4 – 1000 μm , a więc zakres promieniowania widzialnego (0.38–0.77 μm), oraz bliskiej (0.77–25 μm) i dalekiej podczerwieni (25 – 1000 μm) [112].

Strumień ciepła przenoszony na drodze promieniowania ciepła pomiędzy dwoma ciałami o temperaturach T_1 i T_2 ($T_1 > T_2$) można określić z następującej zależności [7, 61, 112]:

$$q_r = \sigma \cdot \varepsilon' \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.9)$$

gdzie σ jest stałą promieniowania ciała doskonale czarnego ($\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$) a ε' emisyjnością zastępczą analizowanego układu.

W temperaturach otoczenia lub niższych promieniowanie ciepła odbywa się za pośrednictwem fal o długościach z zakresu bliskiej i dalekiej podczerwieni [7].

Promieniowanie padające na nieprzezroczyste ciało może być jedynie absorbowane lub odbijane. Z rozważań teoretycznych wynika, iż jeżeli ciało znajduje się w równowadze termodynamicznej, to emituje tyle samo promieniowania, co absorbuje. Oznacza to, że im dane ciało posiada większą zdolność do odbijania promieniowania, tym jego emisyjność jest mniejsza. Warto w tym miejscu podkreślić, iż kryterium gładkości optycznej powierzchni nie jest dobrym kryterium niskiej zdolności emisyjnej – powierzchnie gładkie optycznie dobrze odbijają jedynie promieniowanie o długości fal z zakresu światła widzialnego, co nie jest jednoznaczne ze wysoką zdolnością odbijania fal o długościach z zakresu bliskiej i dalekiej podczerwieni [112].

Przez emisyjność wyraża się zdolność ciała do wypromieniowywania ciepła, a więc, w ujęciu statystycznym, emisji fotonów. Podobnie jak w przypadku fotonowego przewodzenia ciepła w ciele stałym, emisja promieniowania ciepła zmienia się wraz z temperaturą. W ogólnym przypadku można przyjąć, iż poniżej temperatury otoczenia wartość emisyjności ciał stałych zmniejsza się wraz ze spadkiem temperatury. Inny ważnym czynnikiem wpływającym na emisyjność powierzchni ciał stałych jest rodzaj materiału, z którego zostały wykonane oraz od stanu (czystości, chropowatości, sposobu uzyskania, utlenienia) tych powierzchni – powierzchnie gładkie i pozbawione zabrudzeń mają mniejszą emisyjność niż powierzchnie szorstkie i utlenione [7, 112]. Wartości emisyjności materiałów stosowanych w kriogenice przedstawia Tabela 2-3

Tabela 2-3 Emisyjność materiałów stosowanych w technice kriogenicznej

Materiał	Temperatura		
	4.2 K	78 K	300 K
Aluminium	0.011 ^[46, 22]	0.018 ^[46] 0.003 ^[22]	0.03 ^[46] 0.08 ^[22]
Brąz	0.018 ^[46]		0.035 ^[46]
Chrom		0.08 ^[46]	0.08 ^[46]
Miedź	0.005 ^[46]	0.008 ^[46]	0.018 ^[46]
Nikiel		0.022 ^[46]	0.04 ^[46]
Srebro	0.0044 ^[46]	0.008 ^[46]	0.02 ^[46]
Stal nierdzewna	0.011 ^[46]	0.048 ^[46]	0.08 ^[46]
	0.0334 ^[22]	0.061 ^[22]	0.15 ^[22]
Szkło szafirowe	0.018 ^[46]		> 0.9 ^[46]
Złoto		0.01 ^[46]	0.02 ^[46]

Z równania (2.9) bezpośrednio wynika, iż przy zdeterminowanych temperaturach powierzchni cieplej T_1 i zimnej T_2 , ograniczenie promieniowania cieplnego wymienianego przez obydwie powierzchnie możliwe jest jedynie przez zmniejszenie emisyjności zastępczej układu. Wiąże się to z odpowiednim doбором materiałów obydwu powierzchni oraz z uzyskaniem ich odpowiedniego stanu.

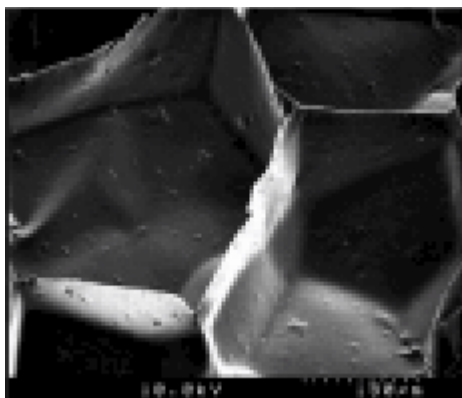
Skutecznym sposobem ograniczania promieniowania ciepła pomiędzy dwoma powierzchniami jest umieszczanie pomiędzy nimi biernych ekranów radiacyjnych, przyjmujących temperatury pośrednie pomiędzy T_1 i T_2 . Z rozważań teoretycznych wynika, że jeżeli bierny ekran radiacyjny oraz powierzchnie wymieniające ciepło charakteryzują się tą samą emisyjnością, to ilość ciepła wymienianego na drodze promieniowania pomiędzy powierzchniami przy obecności jednego ekranu jest dwa razy mniejsza niż przy jego braku. Zastosowanie N takich ekranów spowoduje ograniczenie promieniowania ciepła $N+1$ razy [7, 112].

2.2. Izolacje termiczne wypełnione gazem

Do znajdujących zastosowanie w kriogenice izolacji wypełnionych gazem zalicza się pianki izolacyjne, izolacje proszkowe, aerozele.

2.2.1. Pianki izolacyjne

Pianki izolacyjne charakteryzują się zamkniętą strukturą komórkową powstałą na skutek rozprężania dużej ilości gazu wewnątrz porów materiału pierwotnego. Materiałami pierwotnym pianek izolacyjnych są głównie polistyren oraz poliuretan, rzadziej pewne odmiany gumy, krzemionka oraz inne substancje. Gazami stosowanymi do wytwarzania struktury komórkowej w materiałach pierwotnych są fluorowodory lub CO_2 . Komórkową budowę pianki przedstawia Rysunek 2.3.



Rysunek 2.3 Obraz budowy komórkowej pianki polistyrenowej [115]

Udział fazy stałej w objętości pianki jest niewielki i wynosi około 2%. Pozostałą objętość tworzą komórki o średnicy od 0.01 do 0.1 mm [115]. Obecnie do wytwarzania struktury komórkowej pianek stosuje się głównie takie czynniki jak R134a, i R407C oraz CO_2 [7, 46].

Zamknięciu gazu wewnątrz komórek blokuje konwekcję. Materiały tworzące strukturę komórkową pianek charakteryzują się niskim przewodnictwem cieplnym. W temperaturze otoczenia ciepło przenika przez piankę na drodze przewodzenia ciepła przez ciało stałe (materiał pierwotny), przewodzenia ciepła przez gaz oraz w niewielkim stopniu przez promieniowanie ciepła. Natomiast, jeżeli zastosujemy piankę do izolacji obszarów o temperaturze kriogenicznej, gaz zawarty wewnątrz komórek ulega skropleniu a następnie zestaleniu, co powoduje powstanie swoistej próżni w komórkach i wyeliminowanie przewodzenia ciepła przez gaz [7, 46].

Skuteczność izolacyjna pianek zależy przede wszystkim od rodzaju materiału pierwotnego, gazu wypełniającego komórki oraz rozmiaru komórek.

Współczynniki przewodzenia ciepła materiałów piankowych stosowanych w kriogenice zestawiono w Tabeli 2-4.

Istotne jest, aby materiał pierwotny pianek był słabo przenikliwy dla czynników spieniających, co zapobiega procesowi starzenia się izolacji. Jeżeli gaz z komórek przeniknie do otoczenia, to pory materiału pierwotnego zostaną wypełnione powietrzem a właściwości izolacyjne pianek pogorszą się nawet o 40%. Dla przykładu wyznaczony eksperymentalnie współczynnik przewodności ciepła poliuretanu zawierającego fluorowodór wynosił 17 mW/m·K. Po pewnym okresie czasu stwierdzono, iż fluorowodór z wnętrza pianki przeniknął

Tabela 2-4. Współczynnik przewodzenia ciepła λ pianek izolacyjnych stosowanych w kriogenice dla różnicy temperatur 300 – 77.3 K [7, 46, 110]

Materiał	Gęstość [kg/m ³]	λ [mW/mK]
Poliuretan	11	53
Polistyren	10	46
	15	42
	20	39
	25	37
	30	36
Guma	80	36
Krzemionka	160	55

do otoczenia. Ponowny pomiar przewodności cieplnej próbki wykazał, iż współczynnik przewodzenia ciepła wzrósł do wartości 25 mW/mK [46].

Jeszcze bardziej niekorzystnie na właściwości izolacyjne pianek wpłynąć może przedostanie się helu lub wodoru (gazów o dużym przewodnictwie ciepła i często występujących w stosunkowo dużych stężeniach w pobliżu aparatury kriogenicznej) do komórek pianki. Obecność helu czy wodoru w piankach izolacyjnych zwiększa ich przewodność cieplną nawet o 400%. Istotne jest również niedopuszczenie do przeniknięcia wilgoci do wnętrza izolacji. Po pogorszeniu właściwości izolacyjnych pianek, wilgoć po zamrożeniu na zimnej powierzchni i zwiększeniu swojej objętości, może doprowadzić do uszkodzenia mechanicznego izolacji. Współczynniki rozszerzalności cieplnej pianek są kilkukrotnie większe niż w przypadku metali. Podczas obniżania temperatury aparatury kriogenicznej, pianka, która w temperaturze otoczenia dobrze przylega do powierzchni izolowanej, kurczy się szybciej niż izolowana powierzchnia, co generuje naprężenia rozciągające materiał pianki mogące doprowadzić do jej uszkodzenia. Ze względu na podatność pianek na starzenie oraz uszkodzenia mechaniczne w wyniku skurczów temperaturowych, ich stosowanie w urządzeniach kriogenicznych jest stosunkowo rzadkie [46].

2.2.2. Izolacje proszkowe i wełniane wypełnione gazem

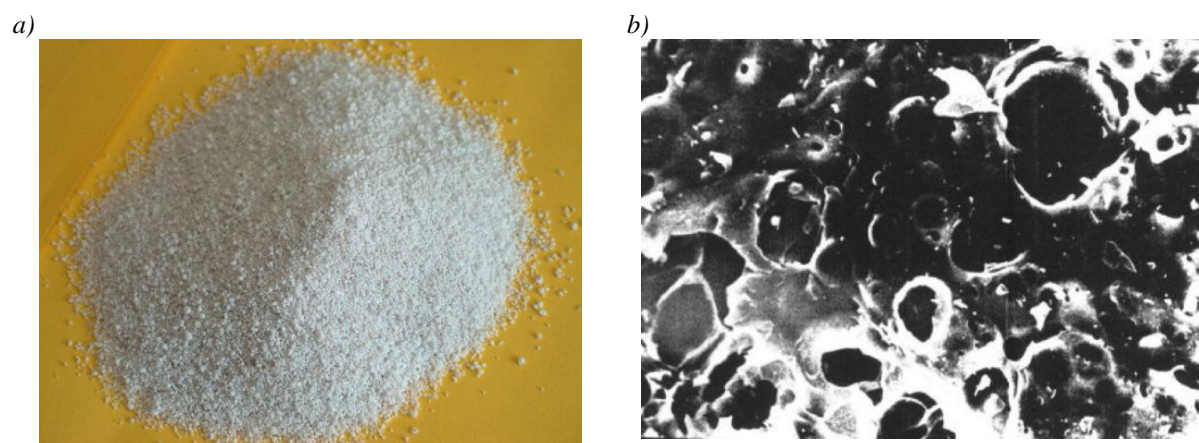
Podobny, jak w przypadku pianek izolacyjnych, efekt izolacyjny można uzyskać również przez wypełnienie przestrzeni izolacyjnej drobnymi proszkami lub materiałami włóknistymi [7, 46, 110]. Uwięzienie gazów w niewielkich przestrzeniach porów włókien i proszków całkowicie eliminuje konwekcję gazu. Materiały proszków charakteryzują się niewielką przewodnością cieplną a powierzchnie kontaktu pomiędzy poszczególnymi ziarnami lub włóknami są niewielkie. Dodatkowo materiały stosowane do produkcji wełen i proszków charakteryzuje dobra zdolność do blokowania promieniowania cieplnego. Z powyższych względów współczynniki przewodzenia ciepła izolacji proszkowych i włóknistych wypełnionych gazem zbliżone są do wartości tych współczynników wyznaczonych dla gazów wypełniających pory [7, 46, 110].

Do najczęściej stosowanych materiałów na tego typu izolacje są wełny szklane oraz proszki głównie perlitu, rzadziej wermikulitu oraz krzemionki koloidalnej. Do proszków izolacyjnych zaliczyć można również szklane kulki (tzw. mikrosfery) oraz granulki aerożelu.

Perlit jest to mineralogicznie kwaśny materiał pochodzenia wulkanicznego powstały z lawy z uwieczonymi kroplami wody stanowiącej 2 – 5% objętości. Perlit składa się głównie z krzemionki SiO_2 (65 – 75%) oraz Al_2O_3 (10 – 18%). Pozostałe składniki to $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ (6 – 9%), $\text{MgO} + \text{CaO}$ (2 – 6%) oraz Fe_2O_3 (1 – 5%).

Wydobyty ze złoża perlit zostaje zmielony do odpowiedniej granulacji a następnie wprowadzony na kilka sekund do pieca, w którym panuje temperatura 900 – 1000 °C. Zamknięte w ziarenkach krople wody wytwarzają parę wodną o ciśnieniach wystarczających do wywołania ekspansji materiału. Równolegle przebiega proces spiekania szkliwa wulkanicznego i w efekcie powstają wewnątrz puste, nieregularne, szkliste banieczki, zwane perlitem ekspandowanym. W procesie ekspansji objętość ziaren zwiększa się od 5 – 20 razy. Wielkość ziaren ekspandowanego perlitu stosowanego w kriogenice do izolacji termicznej waha się w przedziale od 1.0 – 1.6 mm [126]

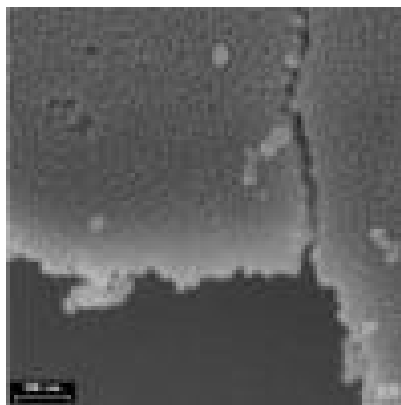
Na Rysunku 2.4 a) pokazano zdjęcie usypanego granulatu perlitu natomiast na Rysunku 2.4 b) zbliżenie powierzchni perlitu ($\times 1000$) wykonane za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) [122].



Rysunek 2.4 Perlit - a) zdjęcie usypanego granulatu perlitu, b) powierzchnia perlitu $\times 1000$ [122]

Wermikulit jest również minerałem pochodzenia wulkanicznego. Proces produkcji proszku jest analogiczny jak w przypadku perlitu – zmielony lub złuszczonego materiał skalny poddawany jest procesowi wygrzewania, w wyniku czego woda zawarta wewnątrz materiału ulega szybkiemu odparowaniu. Ponieważ w wysokiej temperaturze skała ulega zmiękczeniu, wydostająca się z jej wnętrza para wodna kształtuje rozwiniętą strukturę kanalików. Finalnie otrzymuje się drobny, porowaty proszek o średnicy ok. 50 μm charakteryzujący się bardzo dużym stosunkiem powierzchni do objętości. Głównymi składnikami wermikulitu jest krzemionka (37 – 40%), magnez (21 – 29%), aluminium (6 – 10%) oraz niewielkie ilości żelaza (4 – 8%), potasu (3 – 6%), wapnia i węgla (do 2%). Gęstość usypowa w zależności od wielkości granuli wynosi 60 – 120 kg/m^3 . Wermikulit podlega zagęszczeniu w wyniku wstrząsów od 10 – 15%.

Krzemionka koloidalna – są to białe, kłaczkowate, mikroskopijne cząsteczki krzemienia wytwarzane pod wpływem wysokiej temperatury (1100°C) w procesie hydrolizy 6-o chlorku. Przeciętne rozmiary otrzymanych cząsteczek wynoszą od 150 Å do 200 Å [125]. Mikroskopową fotografię cząstki krzemionki koloidalnej prezentuje Rysunek 2.5.



Rysunek 2.5 Krzemionka koloidalna – zdjęcie SEM $\times 500$ [125]

Aerozele są to ciała stałe wytworzone głównie na bazie krzemionki, rzadziej zeolitów i aminokwasów. Charakteryzują się bardzo rozrzedzoną budową szkieletową (ponad 98% objętości materiału to powietrze) o niezwykle małej gęstości (nawet 3 kg/m^3) przy równocześnie wysokiej wytrzymałości mechanicznej, bardzo małej przewodności cieplnej, bardzo rozwiniętej powierzchni ($800 - 1100 \text{ m}^2/\text{g}$) oraz doskonałej odporności na bardzo wysokie temperatury. Charakteryzują się dużą plastycznością – nawet 50% odkształcenie nie powoduje trwałych uszkodzeń materiału [40]. Początki produkcji aerozeli sięgają 1930 roku, kiedy to Kistler wynalazł metodę otrzymywania aerozeli w procesie stapiania idealnie czystej krzemionki w atmosferze nadkrytycznego dwutlenku węgla i "rozdumuchiwanie" jej za pomocą par rozpuszczalników organicznych poprzez stopniowe zmniejszanie ciśnienia [40]. Obecnie stosuje się metody chemiczne polegające na reakcji skrajnie rozrzedzonych czterofunkcyjnych alkoksycylanów z parą wodną (np. $\text{Si}(\text{OCH}_3)_4$) w atmosferze gazu obojętnego. W pierwszym etapie, na skutek hydrolitycznej kondensacji powstaje miękki żel krzemionkowy. Zanim powstająca piana krzemionkowa całkowicie zastygnie, powoli zmniejsza się ciśnienie w reaktorze, aż do uzyskania niemal zupełnej próżni, w efekcie czego następuje gwałtowny wzrost objętości żelu. W końcowym etapie produkcji, reaktor wypełnia się ponownie ostrożnie gazem obojętnym i jednocześnie podnosi się temperaturę, co prowadzi do zakończenia reakcji kondensacji, usztywnienia się piany i powstania trwałego aerożelu.

a)



b)

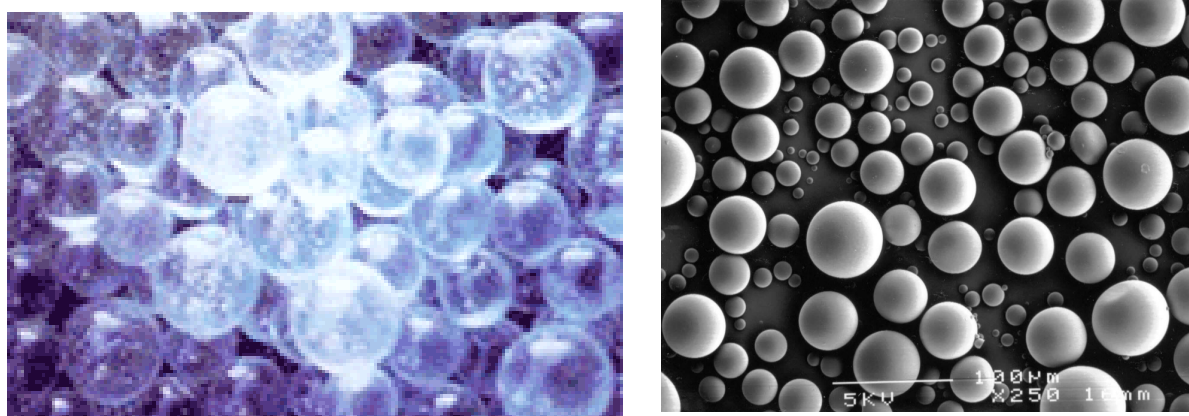


Rysunek 2.6 Wahadłowiec Columbia – a) start wahadłowca, b) moment uszkodzenia skrzydła wahadłowca przez oderwany fragment aerożelowej izolacji termicznej – fot. [123]

Aerozele stosowane w kriogenice są w około 90-ciu procentach porowate, średnica porów wynosi około $20\mu\text{m}$, a gęstość 140 kg/m^3 . Gęstość nasypowa granulatu aerozelowego wynosi około 80 kg/m^3 .

W kriogenicznych izolacjach stosuje się głównie granulaty aerozelowe. Aerożel w płytkach stosuje się do izolacji powierzchni wahadłowców kosmicznych. Przestrzeń kosmiczną wypełnia promieniowanie o równowagowej temperaturze około $2,7\text{ K}$. Natomiast przy powrocie promu kosmicznego, podczas przejścia przez atmosferę ziemską, powierzchnia statku rozgrzewa się kilku tysięcy K. Aerozele charakteryzują się wystarczająco niską przewodnością cieplną w szerokim zakresie temperatur, bardzo dobrą odpornością na wysokie temperatury i obciążenia mechaniczne oraz są lekkie. Ponadto posiadają zdolność do uwalniania wody i pary wodnej z wnętrza materiału, co zapobiega uszkodzeniom mechanicznym izolacji wywołanym zamarzającą wodą [40]. Przypuszcza się, że odpadnięcie źle przymocowanej płytki aerożelu było przyczyną katastrofy wahadłowca Columbia w 2003 r [123].

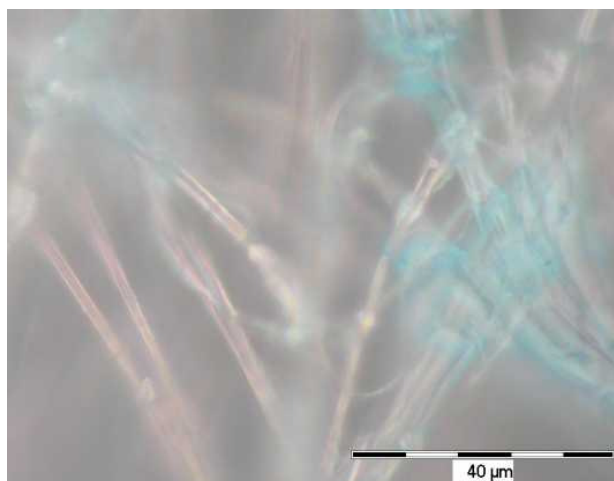
Mikrosfery szklane wytwarzane są w kilkustopniowym procesie, w którym szkło wytwarzane jest z masy sodo-wapienno-bromo-krzemowej, a następnie mielone i ogrzewane do momentu powstania małych szklanych kulek. Następnie powstałe kuleczki wygrzewa się, przez co zawarty w masie szklanej czynnik spęczniający zamienia się w gaz i ekspandując tworzy mikrosferę. Po zakończonym procesie średnica mikrosfery wynosi od 15 do $150\mu\text{m}$, grubość ścianki waha się od $0,5$ do $2,0\mu\text{m}$ a ciśnienie gazu wewnątrz mikrosfer wynosi około 70% ciśnienia atmosferycznego. Gęstość mikrosfer wynosi 125 kg/m^3 , natomiast gęstość usypowa około $60\text{--}65\text{ kg/m}^3$. Obraz mikroskopowy mikrosfer pokazano na Rysunku 2.7 [1, 121].



Rysunek 2.7 Mikrosfery szklane obraz mikroskopowy (SEM) – powiększenie $\times 250$ [1, 121]

Wełna mineralna jest ogólną nazwą zarówno dla wełny kamiennej jak i szklanej, ponieważ w obydwu przypadkach surowiec do ich produkcji jest pochodzenia mineralnego. Wełny te składają się głównie ze sztucznych włókien mineralnych, będącymi bezpostaciowymi krzemianami, w ilości od 95,5 % do 99,5 %, oraz lepiszcza organicznego (wodna emulsja żywicy fenolowo-formaldehydowej),- od 0,5 % do 4,5%.

Wełna kamienna powstaje z bazaltu podczas wytopienia w temperaturze ponad $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ natomiast wełna szklana wytwarzana jest z piasku kwarcowego i stłuczki szklanej wytopianych w temperaturze około 1000°C [120, 124]. Obraz mikroskopowy włókien wełny mineralnej przedstawia Rysunek 2.8.



Rysunek 2.8 Wełna mineralna – fot. J. Poliński

Porównanie różnych materiałów izolacyjnych wypełnionych gazem przedstawiono w Tabeli 2-5

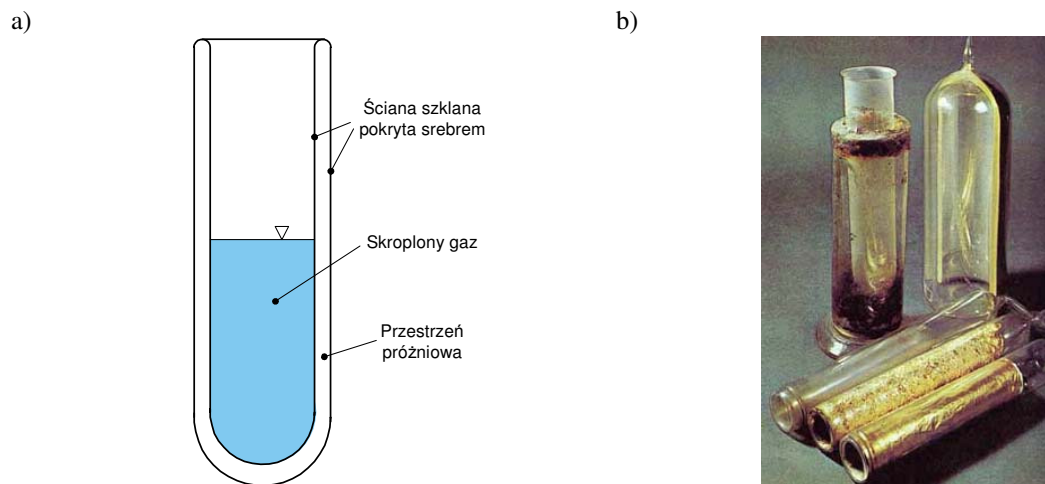
Tabela 2-5 Współczynnik przewodzenia ciepła λ materiałów proszkowych i włóknistych wypełnionych gazem (N_2 , powietrze) stosowanych w kriogenice dla różnicy temperatur 300 – 77.3 K [7, 46, 110]

Materiał	Gęstość [kg/m ³]	λ [mW/m K]
Perlit	50	26
	100	33
	150	35
	210	44
Aerożel	80	19
	100	19,6
Mikrosfery szklane	64	22,1
Wermikulit	120	52
Wełna mineralna	160	35

Porównując wartości współczynnika przewodzenia ciepła dla materiałów porowatych wypełnionych gazem oraz dla czystych gazów (Tabela 2-5 oraz 2-1) można zauważyć, iż λ niektórych izolacji proszkowych (perlit o małej gęstości usypowej, aerożelu oraz mikrosfer szklanych) jest zbliżona do λ gazów wypełniających te izolacje. Oznacza to, że głównym mechanizmem przenikania ciepła przez wymienione izolacje jest przewodzenie ciepła przez gaz. W przypadku izolacji wypełnianych perlitem lub aerożelem można zauważyć, że skuteczność izolacji maleje wraz ze wzrostem gęstości usypowej tych proszków. Wynika to z faktu zwiększania się powierzchni kontaktu pomiędzy poszczególnymi ziarnami proszków a tym samym poprawieniu się warunków przewodzenia ciepła przez ciało stałe. Szczególnie dobrze zjawisko to uwidacznia się w przypadku zastosowania wermikulitu, który charakteryzuje się największą z pośród proszków gęstością usypową [46].

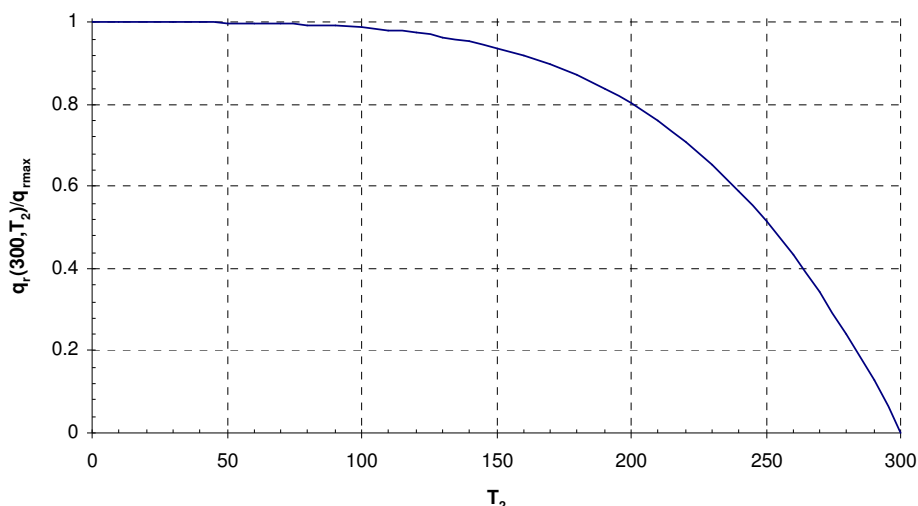
2.3. Próżniowe kriogeniczne izolacje termiczne

Po raz pierwszy izolacja próżniowa została zastosowana przez Jamesa Dewara w roku 1892 [7, 46, 108]. Schemat budowy oraz fotografia naczyń stosowanych przez Dewara do przechowywania skroplonych gazów przedstawiono na Rysunku 2.9. Wytworzenie wysokiego poziomu próżni pomiędzy podwójnymi ściankami szklanego naczynia pozwoliło Dewarowi na eliminację konwekcji ciepła oraz mocno ograniczyło przewodnictwo cieplne gazu wypełniającego przestrzeń pomiędzy ściankami. Dodatkowe posrebrzenie szklanych powierzchni naczynia od strony próżni ograniczyło wymianę ciepła przez promieniowanie.



Rysunek 2.9 Naczynia dewara a) schemat budowy, b) fotografia oryginalnych naczyń stosowanych przez J. Dewara do przechowywania skroplonych gazów [118] .

W procesie przekazywania ciepła do naczynia Dewara istotne jest przekazywanie ciepła przez gaz resztkowy oraz promieniowanie. Można przyjąć, iż przy odpowiednio wysokim poziomie próżni ilość ciepła przenikającego przez gaz resztkowy jest pomijalnie mała w porównaniu z promieniowaniem i całkowity strumień ciepła przenikający przez izolację próżniową można wyznaczyć z zależności (2.9) [92]. Na Rysunku 2.10 przedstawiono względny strumień ciepła wypromieniowany z powierzchni o temperaturze otoczenia $T_1=300$ K i pochłonięty przez powierzchnię o temperaturze T_2 niższej od T_1 , przy założeniu jednakowych emisyjności obydwu powierzchni. Zauważmy, że jeżeli temperatura T_2 należy do zakresu temperatur kriogenicznych (czyli jest niższa od 120 K), to ilość ciepła docierającego do izolowanego obszaru jest w zasadzie stała i nie zależy od temperatury tego obszaru. Dlatego też w technice wysokoefektywnych kriogenicznych izolacji termicznych, obok wytworzenia wysokiego poziomu próżni w przestrzeni izolacyjnej, stosuje się rozwiązania mające na celu ograniczenie oddziaływania promieniowania cieplnego otoczenia na izolowane elementy układów kriogenicznych. Najprostsze rozwiązania, stosowane głównie w średnich i małych systemach kriogenicznych, polegają na umieszczaniu w przestrzeni próżniowej materiałów izolacyjnych, takich jak proszki, wełny czy folie o wysokim stopniu refleksji, odbijających promieniowanie cieplne. Natomiast w dużych obiektach kriogenicznych ekonomicznie opłacalne staje się stosowanie rozwiązań bardziej skomplikowanych, opartych na wykorzystaniu czynnie chłodzonych ekranów radiacyjnych, które, wraz materiałami izolacyjnym, tworzą termiczne systemy izolacyjne [46, 92].



Rysunek 2.10 Względna ilość ciepła przenikająca przez izolację na drodze promieniowania od powierzchni ciepłej izolacji o temperaturze $T_1=300$ K do powierzchni o temperaturze $T_2 < T_1$

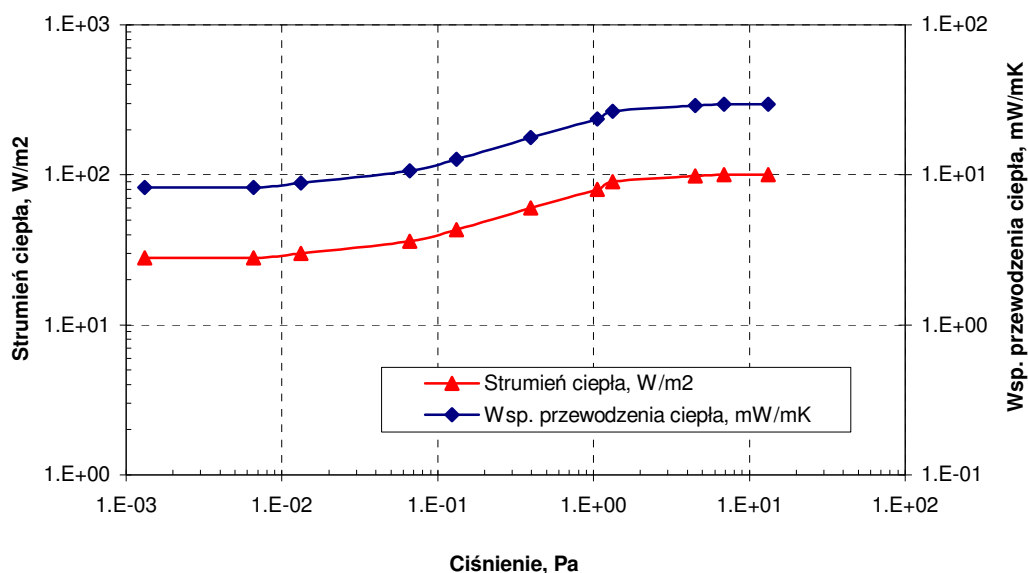
2.3.1. Izolacja próżniowa

Z równania (2.9) bezpośrednio wynika, iż przy danej różnicy temperatur, a więc przy zdefiniowanych temperaturach powierzchni ciepłej T_1 i zimnej T_2 , ograniczenie ciepła przekazywanego przez promieniowanie, możliwe jest jedynie poprzez zmniejszenie emisyjności zastępczej układu.

Często w celu ograniczenia promieniowania cieplnego powierzchni o wysokiej emisyjności pokrywa się materiałem o niskiej emisyjności. Już J. Dewar w pierwszych konstrukcjach swoich naczyń intuicyjnie pokrywał powierzchnie szklane od strony próżni cienką warstwą srebra [7, 110] – porównaj Rysunek 2.9 b). Jak wynika z Tabeli 2-3, taki zabieg zmniejsza emisyjność tak zmodyfikowanej powierzchni ponad 4-okrotnie. Pokrywanie powierzchni innym materiałem ma też miejsce w sytuacjach, kiedy uzyskanie pożądanej emisyjności powierzchni materiału poprzez polerowanie lub zastosowanie materiału konstrukcyjnego o niskiej emisyjności wiąże się z wysokimi kosztami wytworzenia urządzeń kriogenicznych. Na przykład płaszcze próżniowe wielu urządzeń kriogenicznych wykonuje się ze stali węglowych [110]. Elementy te charakteryzują się dużymi wymiarami geometrycznymi oraz poddawane są dużym obciążeniom, przez co ilość materiału potrzebna do ich wykonania jest stosunkowo duża. Za wyborem stali węglowej do produkcji płaszczy próżniowych przemawia fakt, iż jest ona około 5-krotnie tańsza od stali nierdzewnej, a właściwości mechaniczne obydwu gatunków stali w temperaturze powyżej -50°C są zbliżone [110]. Jednak powierzchnia stali węglowych wystawiona bezpośrednio na działanie atmosfery szybko utlenia się, przez co jej emisyjność jest dużo większa niż powszechni stali nierdzewne. Dlatego powierzchnie wewnętrzne płaszczy próżniowych wykonanych ze stali konstrukcyjnej często pokrywa się samoprzylepną taśmą pokrytą cienką warstwą aluminium.

Porównanie skuteczności izolacji próżniowej ze skutecznością innych izolacji termicznych naraża pewien problem. Jak opisano w punkcie 2.1.2 niniejszej pracy, w przypadku obniżenia ciśnienia gazu do poziomu, w którym wymiana ciepła pomiędzy dwoma płaszczyznami za pośrednictwem gazu zachodzi w warunkach molekularnych, ilość wymienianego ciepła nie jest zależna od odległości pomiędzy powierzchniami a od ciśnienia gazu (poziomu próżni). Podobnie promieniowanie ciepła, nie zależy od tej odległości. Dlatego wyznaczenie współczynnika przewodzenia ciepła dla izolacji próżniowej, który powinien opisywać ilość ciepła przenikającego przez daną grubość izolacji przy danej różnicy temperatur, jest pozbawione sensu fizycznego. W celu przedstawienia skuteczności izolacji

próżniowej na Rysunku 2.11 przedstawiono wyniki badań strumienia ciepła przenikającego przez izolację próżniową wykonane przez Jacoba i innych [62] dla różnego poziomu próżni w zakresie temperatur 300 – 77.3 K. Badania przeprowadzono na kriostacie cylindrycznym, którego płaszcz zewnętrzny wykonano z polerowanej stali nierdzewnej o średnicy 230 mm natomiast zbiornik badawczy o średnicy 100 mm wykonano z polerowanej miedzi. Dodatkowo na Rysunku 2.11 przedstawiono współczynnik przewodzenia ciepła wyznaczony dla opisywanej konfiguracji izolacji próżniowej.



Rysunek 2.11 Skuteczność izolacji próżniowej w zależności od poziomu próżni.

Jak wynika z Rysunku 2.11, dla ciśnienia gazu mniejszego niż $1 \cdot 10^{-2}$ Pa dalsze zmniejszanie ciśnienia gazu nie powoduje obniżenia ilości ciepła przenikającego przez izolację. Spowodowane to jest faktem, iż zmniejszanie ciśnienia gazu powoduje ograniczenie przenikania ciepła przez izolację jedynie na drodze przewodzenia ciepła przez gaz, natomiast nie wpływa na promieniowanie ciepła, które utrzymuje się na stałym poziomie i dla niskich ciśnień gazu jest mechanizmem dominującym w przenikaniu ciepła przez izolację. Oznacz to, że w dobrze działającej izolacji próżniowej wystarcza, aby ciśnienie gazu zostało obniżone do poziomu gwarantującego, aby ilość ciepła przewodzonego przez gaz była co najmniej o rząd mniejsza od ilości ciepła przekazywanej za pomocą innych mechanizmów.

Wadą izolacji próżniowych stosowanych do izolowania obszarów o temperaturach kriogenicznych bezpośrednio od otoczenia jest duże oddziaływanie promieniowania cieplnego na izolowane elementy. Dlatego w takich warunkach pracy izolacja ta stosowana jest niezwykle rzadko, na ogół w konstrukcjach charakteryzującymi się niewielkimi gabarytami, w których nie możliwe lub nieopłacalne jest umieszczenie innego rodzaju wysokoefektywnych izolacji termicznych [11]. Okazuje się jednak, że izolacja próżniowa staje się bardzo skuteczna w systemach izolacyjnych skroplonego helu wykorzystujących czynne ekrany radiacyjne chłodzone skroplonym. Oszacowując, na podstawie równania (2.9) przy uwzględnieniu wartości emisyjności materiałów zamieszczonych w Tabeli 2-3, ilość ciepła wymienianego pomiędzy czynnym ekranem radiacyjnym a powierzchnią o temperaturze skroplonego helu, okazuje się, że otrzymywane wartości strumieni ciepła nie przekraczają kilkudziesięciu mW/m^2 . Wynika to głównie z bardzo dużego obniżenia temperatury powierzchni, z której promieniowanie dociera do powierzchni izolowanej. W przypadku stosowania czynnych ekranów radiacyjnych chłodzonych azotem temperatura

cieplej powierzchni izolacji jest redukowana prawie 4-o krotnie w stosunku do temperatury otoczenia, co powoduje redukcję wartości członu T_l^4 w zależności (2.9) o 230 razy. Dodatkowo, wraz ze spadkiem temperatury zmniejszają się również wartości emisyjności powierzchni materiałów uczestniczących w wymianie ciepła. W takich warunkach pracy izolacja próżniowa często okazuje się być najlepszym, pod względem zdolności izolacyjnych, rozwiązaniem. Należy jednak podkreślić, iż utrzymanie dobrych parametrów izolacji w tych warunkach wiąże się z koniecznością wytworzenia próżni izolacyjnej na poziomie rzędu $1 \cdot 10^{-6}$ Pa (por. rys. 2.2).

Interesującą koncepcję ograniczenia dopływów ciepła do powierzchni o temperaturze skroplonego helu, zakładającą pokrycie izolowanych powierzchni materiałami nadprzewodzącymi zaproponował w 1973 roku Jones [67]. Jak wynika z teorii nadprzewodnictwa zaproponowanej przez Bardeena, Coopera i Schrieffera, nadprzewodnik może absorbować jedynie fotony energii większe niż przerwa energetyczna pomiędzy pasmem nadprzewodzący a normalnym. Innymi słowy, nadprzewodniki znajdujące się w temperaturze T nie absorbują promieniowania o długości fal większych niż wynika to z poniższego równania [117]:

$$\lambda_c > \frac{hc}{3,5 \cdot k_B T_c} \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.10)$$

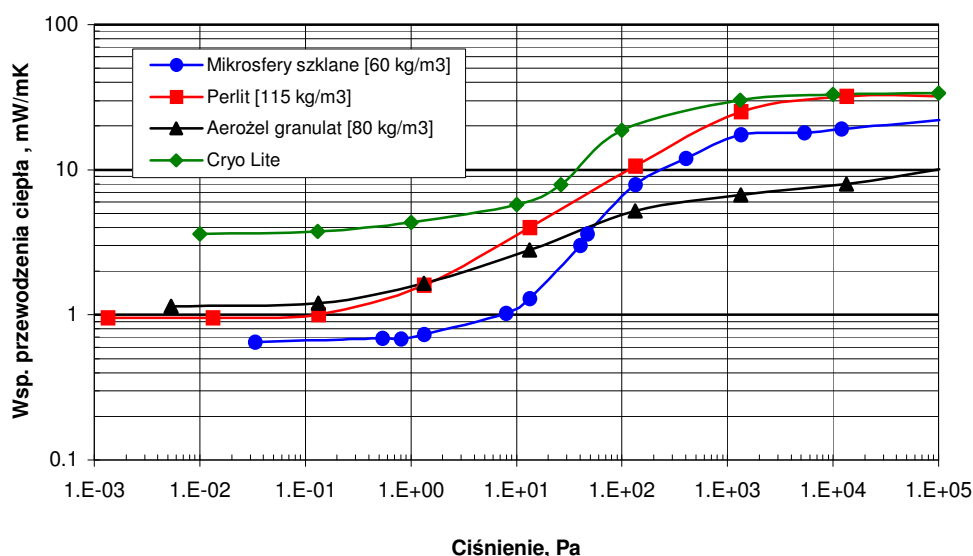
gdzie λ_c jest maksymalną długością fali absorbowanej, h stałą Planka, c prędkością światła, k_B stałą Boltzmanna a T_c temperaturą krytyczną nadprzewodnika. Jak wynika z równania (2.10), w celu absorbowania jak najmniejszej ilości promieniowania cieplnego należy stosować nadprzewodniki o jak najwyższej temperaturze krytycznej umieszczane w temperaturze możliwie jak najniższej. Jones w [67] podjął próbę teoretycznego wyznaczenia emisyjności niobu ($T_c=9.3$ K) w temperaturze 4.2 K i mniejszej od 2 K, otrzymując bardzo optymistyczne wyniki – $\varepsilon=10^{-4} - 10^{-5}$ dla temperatury 4.2 K oraz $\varepsilon=10^{-6} - 10^{-7}$ dla temperatury pomiędzy 1 – 2 K. Natomiast w 1990 roku Zeller w [117] przeprowadził teoretyczne rozważania dla kilku rodzajów dostępnych technicznie nadprzewodników umieszczonych w temperaturze 4.2 K dotyczące ich zdolności odbijania promieniowania cieplnego padającego z ciała doskonale czarnego znajdującego się w temperaturze 77.3 K. Analiza została przeprowadzona dla nadprzewodnika Nb_3Sn ($T_c=9.3$ K), $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ($T_c=90$ K), $BiCaSrCuO$ ($T_c=110$ K) oraz nadprzewodnika hipotetycznego o $T_c=150$ K. Otrzymane przez Zellera wyniki obliczeń dla Nb_3Sn wskazują, że nadprzewodnik ten w temperaturze 4.2 K jest w stanie odbijać promieniowanie o długości fal większą niż $2.25 \cdot 10^{-5}$ nm, co stanowi jedynie 2% całkowitego promieniowania docierającego do powierzchni materiału. Wynika z tego, że teoretyczna wartość emisyjności Nb_3Sn w temperaturze skroplonego helu wynosi aż 0.98. W analogiczny sposób Zeller otrzymał wartości emisyjności dla pozostały nadprzewodników, które wynoszą odpowiednio: dla $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 0.39, dla $BiCaSrCuO$ 0.25 oraz dla nadprzewodnika hipotetycznego 0.08. Analiza teoretyczna przeprowadzona przez Zellera sugeruje, że emisyjność nadprzewodników w temperaturze skroplonego helu jest znacznie większa niż na przykład wartości emisyjności materiałów konstrukcyjnych komercyjnie dostępnych takich jak polerowana miedź czy aluminium. Po za tym Zaller, na przykładzie nadprzewodnika $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, wskazał na inne ograniczenia związane z możliwością wykorzystania takich materiałów w celach izolacji termicznych, a mianowicie: wysoki koszt materiału nadprzewodzącego, wysokie koszty metody nakładania nadprzewodnika na materiały nośne (natryskiwanie plazmowe), degradacja właściwości nadprzewodzących na skutek pęknięcia struktury materiału w wyniku cyklicznych skurczy termicznych, obecności pola magnetycznego oraz wyniku oddziaływania wilgoci zawartej w powietrzu

atmosferycznym. Pomimo perspektywicznych możliwości wykorzystania materiałów nadprzewodzących do poprawy właściwości izolacji próżniowych pracujących w zakresach temperatur 77.3 – 4.2 K brak jest jakichkolwiek doniesień na temat eksperymentalnej weryfikacji powyższych analiz teoretycznych.

Niewątpliwą wadą izolacji próżniowych jest ich duża czułość na poziom próżni. Nawet niewielki wzrost ciśnienia gazu powoduje znaczny wzrost ilości ciepła dopływającego do powierzchni izolowanej. Powolna degradacja próżni może następować na skutek przecieków gazów z otoczenia lub z przestrzeni izolowanej przez ewentualne nieszczelności jak również w wyniku procesu odgazowania materiałów. Dlatego próżnia izolacyjna powinna być okresowo regenerowana lub w przypadkach dużych instalacji kriogenicznych, pompowana w sposób ciągły.

2.3.2. Izolacje proszkowo - próżniowe

Jak wcześniej wspomniano, w przypadku izolacji proszkowych wypełnianych gazem, głównym mechanizmem przenikania ciepła jest przewodzenia ciepła przez gaz. Dlatego obniżenie ciśnienia gazu do bardzo niskiego poziomu, w którym droga swobodna cząstek gazu będzie większa niż wymiary przestrzeni między cząstkami proszków lub włóknami wełn, poprawia właściwości cieplne takiej izolacji. Na Rysunku 2.12 przedstawiono wartości współczynnika przewodzenia ciepła izolacji proszkowej i wełnianej w zależności od ciśnienia gazu w przestrzeni próżniowej dla zakresu temperatur 300 - 77.3 K.



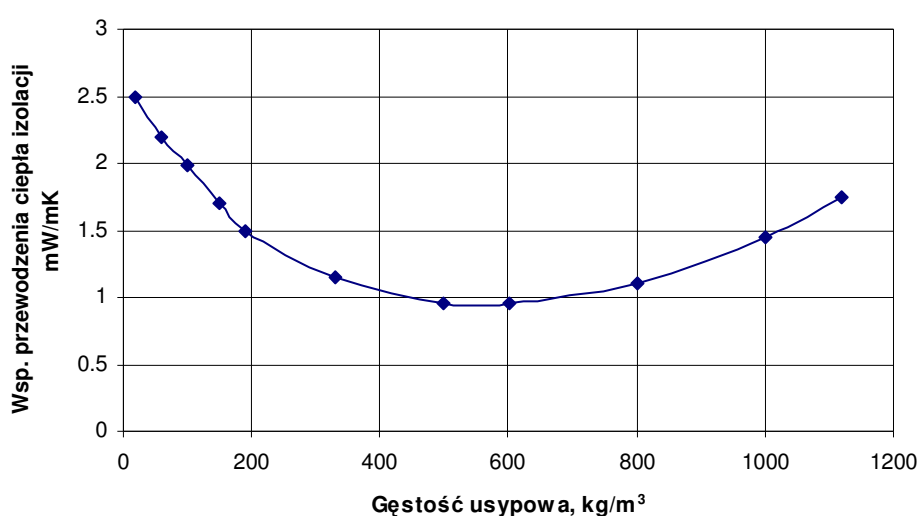
Rysunek 2.12 Skuteczność izolacji proszkowo próżniowych w funkcji ciśnienia gazu dla zakresu temperatur 300 - 77.3 K [4, 1, 40, 119].

Jak wynika z Rysunku 2.12, obniżenie ciśnienia do poziomu niższego od 0.1 Pa poprawia skuteczność izolacji, w ogólnym przypadku, o rząd wartości. Wytworzenie i utrzymywanie tak niskiego poziomu próżni stawia określone wymagania materiałom, które umieszcza się w przestrzeni próżniowej. Najważniejszym parametrem klasyfikującym dany materiał do współpracy z próżnią jest niski poziom odgazowania [54, 57]. Gazy rozpuszczone w materiale i znajdujące się na jego powierzchni w trakcie procesu wytwarzania próżni przedostają się do przestrzeni próżniowej. Niski poziom odgazowania materiału pozwala na szybki proces wytworzenia próżni oraz stanowi gwarancję braku szybkiej degradacji próżni podczas eksploatacji izolacji. Wystarczająco niskim stopniem odgazowania charakteryzują się perlity, aerożele oraz mikrosfery szklane, będące typowymi wypełnieniami izolacji proszkowo-próżniowych. Stosowanie izolacji próżniowych wypełnionych materiałami

włóknistymi jest sporadyczne w porównaniu z izolacjami proszkowo – próżniowymi, wyjątek stanowi produkowana przez firmę Lydall Ltd. wełna o handlowej nazwie Cryo-Lite® [119].

Szczególnie predestynowane do izolacji próżniowych są aerozele. Ze względu na ich szkieletową budowę, gazy uwięzione w ich strukturze są bardzo dobrze ewakuowane podczas pompowania próżni. Jeżeli przed instalacją aerożelu w przestrzeni izolacyjnej podda się go procesowi wygrzewania, a w szczególności wygrzewania próżniowego, materiał ten staje się bardzo dobrym sorbentem gazów i wilgoci [4]. Podobne właściwości sorpcyjne posiada perlit.

Ze względu na eliminację oddziaływania gazu, szczególny wpływ na skuteczność izolacji proszkowo - próżniowych mają czynniki wpływające na przewodzenie ciepła przez ciało stałe oraz promieniowanie. Z przyczyn opisywanych w punkcie 2.2.2 niniejszej pracy dosyć istotny wpływ na skuteczność izolacji ma odpowiedni dobór gęstości stosowanych proszków. Na Rysunku 2.13 przedstawiono współczynnik przewodzenia ciepła przez izolację próżniową wypełnioną perlitem w zależności od gęstości usypowej proszku [7].

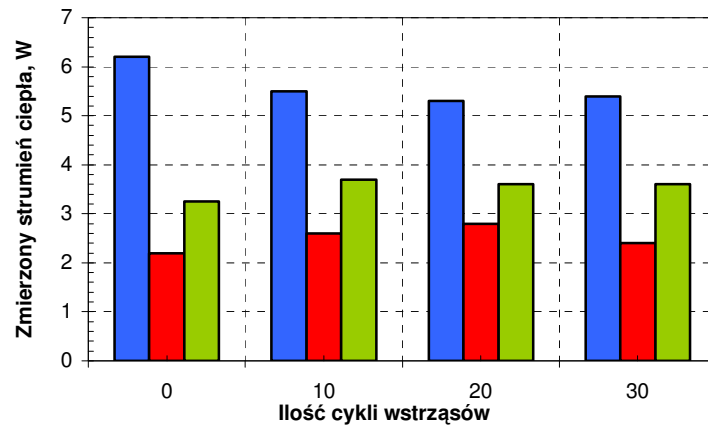


Rysunek 2.13 Wpływ gęstości usypowej proszku na współczynnik przewodzenia ciepła izolacji próżniowej wypełnionej perlitem [7]

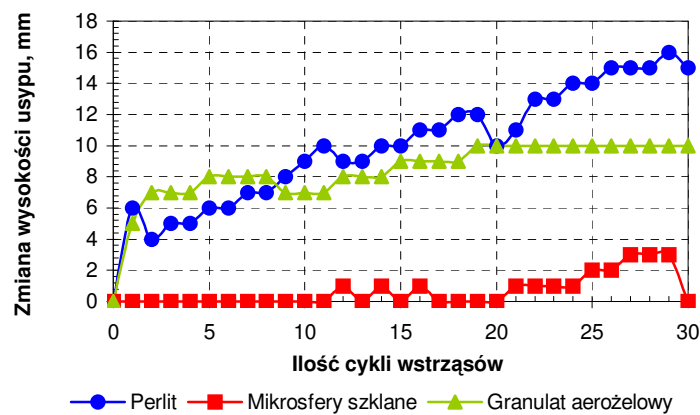
W urządzeniach kriogenicznych mogą występować wibracje lub wywołane skurczami cieplnymi względne przesunięcia elementów prowadzące do zagęszczania usypanych proszków, co zarówno zwiększa ilość ciepła przewodzoną przez materiał proszku jak i zmniejsza wysokość zasypania przestrzeni próżniowej wystawiając górne powierzchnie izolowane na bezpośrednie oddziaływanie promieniowania cieplnego.

Zjawisko samozagęszczania się materiałów proszkowych oraz wpływem wibracji na skuteczność izolacji proszkowo jest analizowane przez Fesmire i innych w [43]. Autorzy badali perlit o początkowej gęstości usypowej 100 kg/m^3 , mikrosfery szklane (60 kg/m^3) oraz granulaty aerożelowy (80 kg/m^3) poddając proszki łącznie 30 cyklom wstrząsów o częstotliwości 28 Hz i długości 2 minut. Każdy z cykli symulował jeden proces napełniania lub opróżniania zbiornika. Badane materiały umieszczano w przestrzeni próżniowej zbiornika o specjalnej konstrukcji, pozwalającej na śledzenia zmian poziomu napełnienia przestrzeni próżniowej przez proszki. Przed serią wstrząsów i po każdych 10 cyklach wstrząsów dokonywano wyznaczenia aktualnej skuteczności poszczególnych izolacji poprzez wyznaczanie dopływów ciepła do skroplonego azotu wypełniającego zbiornik – Rysunek 2.14.

a)



b)



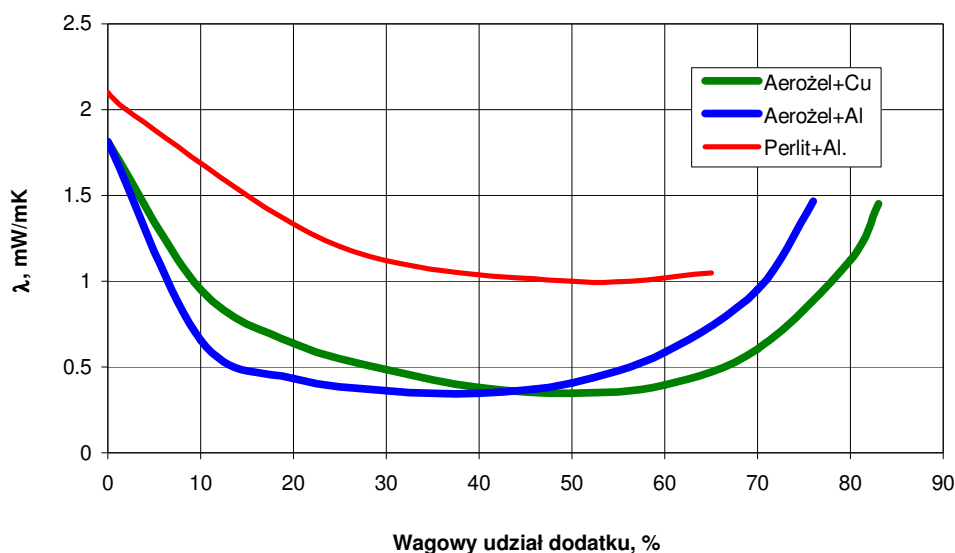
Rysunek 2.14 Wyniki badań Fesmire [43] wpływu vibracji na: a) skuteczność izolacji proszkowo – próżniowej, b) zmianę wysokości usypu proszku w przestrzeni próżniowej

Pomimo wstrząsów mikrosfery szklane praktycznie nie zmieniły swojej wysokości usypowej. W przypadku granulatu aerożelowego, w początkowej fazie badań proszek ten się częściowo uległ kompresji, ale po osiągnięciu pewnej wartości nie podlegał dalszemu zagęszczaniu. Natomiast perlit przy kolejnych seriach wstrząsów każdorazowo podlegał zagęszczeniu przy czym tendencja ta była niezmienna nawet w końcowej fazie badań. Można domniemywać, iż perlit uzyska stałą gęstość usypową dopiero po bardzo dużej ilości serii wstrząsów.

Ilość ciepła przewodzonego przez izolację wypełnią mikrosferami szklanymi na początku i na końcu badań była zbliżona. W środkowej części badań, kiedy zaobserwowano niewielki wzrost zagęszczenia mikrosfer, również mierzony strumień ciepła uległ niewielkiej intensyfikacji. Podobnie wpływ zagęszczenia na ilość ciepła przenikającego przez izolację zaobserwowano w przypadku granulatu aerożelowego, którego skuteczność izolacyjna spadała wraz ze wzrostem gęstości usypowej uzyskując stały poziom w końcowej fazie badań. Natomiast w przypadku perlitu wzrost zagęszczenia początkowo poprawiał skuteczność izolowania a następnie, przy dużej kompresji, skuteczność izolowania spadała. Należy zwrócić uwagę, że wyniki uzyskane przez Fesmire dla perlitu potwierdzają charakterystykę pokazaną na Rysunku 2.13.

Poprawę skuteczności izolacji próżniowych wypełnionych perlitem i granulem aerożelowym można uzyskać poprzez dodatek rozdrobnionych materiałów charakteryzujących się dużo większą zdolnością odbijania promieniowania niż materiały

proszków [7, 46, 110]. Na ogół materiałami domieszkowymi proszków są miedź, aluminium lub folie plastikowe o powierzchniach pokrytych cieką warstwą takich metali. Ponieważ zarówno miedź jak i aluminium są dobrymi przewodnikami ciepła to wzrost zawartości tych materiałów w proszkach izolacyjnych, z jednej strony, powoduje ograniczenie promieniowania przenikającego przez izolację, z drugiej zaś, intensyfikuje przewodzenie ciepła przez materiał proszków. Dlatego też procentowa zawartość domieszek metali w proszkach powinna być optymalizowana. Na Rysunku 2.15 przedstawiono skuteczność izolacji proszkowo – próżniowych w zależności od procentowego udziału masowego zastosowanych domieszek w proszkach K [46].



Rysunek 2.15. Wpływ wagowego udziału dodatku materiałów refleksyjnych na współczynnik przewodzenia ciepła izolacji proszkowo – próżniowych w zakresie temperatur 300 – 77.3 K [46].

Z danych prezentowanych na rysunku 2.20 wynika, że optymalna wartość udziału wagowego materiałów refleksyjnych dodanych do proszków izolacyjnych wynosi około 50%. Tak ilość materiałów refleksyjnych poprawia skuteczność izolacji proszkowych ponad dwukrotnie.

Poprawienie zdolności odbijania promieniowania cieplnego przez mikrosfery uzyskuje się przez pokrycie ich cienką warstwą aluminium, jednak zabieg taki powoduje zwiększenie ilości przewodzonego ciepła przez ścianki mikrosfer. Badania optymalnej powierzchni pokrycia ścianki mikrosfery warstwą aluminium pokazały, że najlepszy efekt izolacyjny dają mikrosfery połowicznie pokryte aluminium lub mieszanka mikrosfer całkowicie pokrytych aluminium i mikrosfer bez pokrycia w stosunku 1:1 [7].

Izolacje próżniowe wypełniane proszkami lub materiałami włóknistymi stosuje się głównie do izolowania obszarów kriogenicznych o temperaturach skroplonego azotu (77.3 K) i wyższych. Odnotowane są również przypadki stosowania takich izolacji przy użytkowaniu niewielkich zbiorników na skroplony wodór [20]. Natomiast tego typu izolacji nie stosuje się w systemach izolacyjnych skroplonego helu z wykorzystaniem czynnych ekranów radiacyjnych. W Tabeli 2-6, przedstawiono podsumowanie wartości współczynnika przewodzenia ciepła izolacji próżniowych wypełnionych różnymi materiałami [7, 46, 110].

Tabela 2-6 Współczynnik przewodzenia ciepła λ izolacji próżniowej wypełnionej materiałami proszkowymi i włóknistymi dla różnicy temperatur 300 – 77.3 K, ciśnienia gazu $p < 10^{-2}$ Pa K [7, 46, 110]

Materiał	Gęstość [kg/m ³]	λ [mW/m·K]
Perlit	60	2.1
	100	1.8
	130	1.2
	140	1.0
	180	0.95
Aerożel	80	1.6
	96	1.78
Mikrosfery szklane		
Nie powlekane	230	0.72
Połowicznie powlekane Al.	130	0.39
Całkowicie powlekane Al.	280	0.60
Mieszanka powlekanych/ nie powlekanych 50/50	205	0.43
Aerożel + Cu.50/50	180	0.33
Aerożel + Al. 40/60	160	0.35
Wełna mineralna	50	1.7
Cryo-lite®	60	3.7

Do końca lat 60-tych ubiegłego stulecia izolacja proszkowo – próżniowa była bardzo szeroko stosowana do izolowania zbiorników na skroplone gazy, niezależnie od ich pojemności. Po opracowaniu w 1956 roku wielowarstwowej izolacji próżniowej w ciągu jednej dekady nowy rodzaj izolacji wyparł izolacje proszkowe z zastosowań do zbiorników małej i średniej pojemności (do kilku m³) [20, 43]. Natomiast po dzień dzisiejszy podstawową izolację bardzo dużych zbiorników (do kilkuset m³) nadal stanowi izolacja proszkowo – próżniowa. Taki stan rzeczy wynika z kilku przyczyn. Po pierwsze, izolacje zawierające proszki stanowią pewną dodatkową podporę mechaniczną dla wewnętrznych naczyń zbiorników ze skroplonymi gazami, co usztywnia konstrukcję takich zbiorników. Po za tym, w przypadku bardzo dużych zbiorników, stosunek powierzchni izolowanej do objętości przechowywanej cieczy jest stosunkowo niewielki, a więc stosowanie nieco mniej skutecznych izolacji termicznych w takich przypadkach nie wiąże się ze znacznymi stratami przechowywanych gazów. Nie bez znaczenia jest również łatwość instalacji izolacji proszkowo-próżniowych.

Ze względu na skłonność do zagęszczania się perlitu w wyniku wstrząsów, izolacje proszkowo – próżniowe zawierające perlit szczególnie szybko zostały wyparte ze stosowania w zbiornikach i cysternach transportowych. Jednak obecnie pojawia się możliwość powrotu do stosowania izolacji proszkowo – próżniowych w takich aplikacjach dzięki możliwości

wytworzenia proszków charakteryzujących się małym stopniem samokompresji (granulat aerożelowy) lub jej brakiem (mikrosfery szklane).

Porównanie poszczególnych typów izolacji termicznych stosowanych w kriogenice szczegółowo przedstawiono w Załączniku B niniejszej pracy. Wynika z niego, iż skuteczną izolacją łączącą zalety izolacji próżniowej z ograniczaniem promieniowania oraz zadawalającymi parametrami nawet w warunkach zdegradowanej próżni stanowi wielowarstwowa izolacja próżniowa – porównaj Rysunek B.1. Dążenie do uzyskiwania jak najwyższych efektywności wielowarstwowych izolacji próżniowych jest obecnie główną tendencją rozwoju kriogenicznych izolacji termicznych. Z tego względu w dalszej części niniejszej pracy skupiono się na aspektach związanych z przepływem ciepła przez wielowarstwową izolację próżniową, czynnikami wpływającymi na jej skuteczność oraz możliwość jej optymalizacji.

3. Cele, tezy i zakres pracy

Cele pracy

- synteza stanu wiedzy dotyczącej izolacji termicznych wykorzystywanych w technice kriogenicznej ze szczególnym uwzględnieniem wielowarstwowej izolacji próżniowej
- matematyczny model procesów przenikania ciepła przez wielowarstwową izolację próżniową wraz z algorytmem rozwiązania numerycznego i implementacją modelu, weryfikacja doświadczalna modelu
- opracowanie wytycznych projektowania wielowarstwowych izolacji próżniowych zależnych od warunków brzegowych oraz warunków pracy izolacji

Teza pracy:

Wielowarstwowe izolacje próżniowe charakteryzujące się małym stopniem kompresji warstw¹ mogą być modelowane z dokładnością wystarczającą do obliczeń inżynierskich, pod warunkiem uwzględnienia zależności od temperatury emisyjności ekranów radiacyjnych oraz przewodności cieplnej materiału przekładki.

W przypadku dużego stopnia kompresji warstw należy dodatkowo uwzględnić wzrost przewodności cieplnej miejscowych kontaktów przekładek z przyległymi ekranami radiacyjnymi.

Zakres pracy

- przegląd literaturowy stanu wiedzy dotyczącej rozwiązań technicznych i własności kriogenicznych izolacji termicznych
- zestawienie i porównanie danych literaturowych dotyczących przepływu ciepła przez wielowarstwowe izolacje próżniowe oraz metod modelowania przenikania ciepła przez takie izolacje
- przyjęcie zbioru parametrów niezbędnych do opisu procesu przenikania ciepła przez wielowarstwową izolację próżniową
- opracowanie modelu przenikania ciepła przez wielowarstwową izolację próżniową wraz z algorytmem rozwiązania numerycznego i implementacją modelu, wykonanie obliczeń numerycznych,
- analityczne określenie wpływu zmian niektórych własności fizycznych materiałów stosowanych do wykonania wielowarstwowej izolacji próżniowej na właściwości izolacji.
- zaplanowanie eksperymentu pozwalającego na weryfikację założeń i wyników modelu oraz wyznaczenie niezbędnych własności materiałowych izolacji,
- opracowanie koncepcji, konstrukcja i budowa kriostatu badawczego,
- wykonanie pomiarów przenikania ciepła przez wielowarstwową izolację próżniową w zmiennych warunkach pracy oraz dla różnych sposobów wykonania izolacji, weryfikacja założeń i wyników modelu, wyznaczenie wybranych własności materiałowych badanych izolacji.

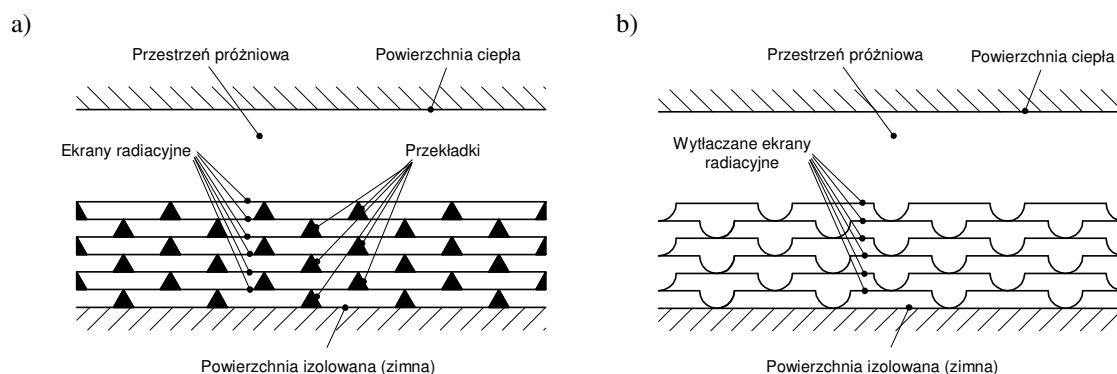
¹ W większości wykonanych wielowarstwowych izolacji próżniowych mały stopień kompresji warstw uzyskuje się przy nawinięciu nie więcej niż około 30 warstw na 1 cm grubości izolacji

- opracowanie wyników pomiarów, porównanie z wybranymi wynikami modelowania, weryfikacja modelu
- przeprowadzenie obliczeń optymalizacyjnych pozwalających na wskazanie najlepszego sposobu wykonania wielowarstwowej izolacji próżniowej w zależności od warunków brzegowych i warunków pracy izolacji

4. Wielowarstwowa izolacja próżniowa

Wielowarstwowa izolacja próżniowa została zaproponowana przez Matsha w 1956 roku [4] i polega na umieszczeniu w przestrzeni próżniowej od kilku do kilkudziesięciu biernych ekranów radiacyjnych o niskiej emisyjności powierzchni. Ponieważ ekrany radiacyjne charakteryzują się dobrą przewodnością cieplną, w celu ograniczenia przewodzenia ciepła pomiędzy sąsiadującymi ekranami na ogół przedziela się je materiałami o małej przewodności cieplnej. Rzadziej stosowane w tym celu rozwiązanie polega na zastosowaniu pogniecionych lub specjalnie wytłaczanych ekranów radiacyjnych, dzięki czemu powierzchnia kontaktu pomiędzy sąsiadującymi ekranami jest bardzo niewielka [89]. Tak utworzona struktura wielowarstwowej izolacji próżniowej powoduje bardzo silne ograniczenie przenikania ciepła na drodze promieniowania ciepła i przewodzenia ciepła przez ciała stałe, a wysoki poziom próżni zapewnia redukcję przewodnictwa cieplnego gazu.

Schemat wielowarstwowej izolacji próżniowej pokazano na Rysunku 4.1



Rysunek 4.1. Schemat wielowarstwowej izolacji próżniowej, a) z przekładkami pomiędzy ekranami radiacyjnymi, b) z wytłaczanymi ekranami radiacyjnymi (bez przekładek)

Z pośród technicznie dostępnych termicznych izolacji kriogenicznych wielowarstwowa izolacja próżniowa charakteryzuje się najlepszymi właściwościami izolacyjnymi w zasadzie dla wszystkich temperatur pracy spotykanych w kriogenice. Z tego względu często w literaturze nazywana jest mianem superizolacji [9, 27, 48, 87].

Obecnie wielowarstwowa izolacja próżniowa jest najpowszechniej stosowanym typem kriogenicznej izolacji termicznej. Taki stan rzeczy, obok doskonałej efektywności, jest również wynikiem wciąż malejących kosztów wytwarzania materiałów, z których wykonuje się superizolację. Do niedawna izolacja ta znajdowała zastosowanie jedynie w małych i średnich helowych i wodorowych urządzeniach badawczych oraz zbiornikach do przechowywania skroplonych gazów. W chwili obecnej wykorzystywana jest na szeroką skalę do izolowania dużych instalacji kriogenicznej separacji i skraplania gazów oraz rurociągów i cystern transportu skroplonych gazów o strunowo wysokich temperaturach wrzenia (azot, tlen, argon, metan), a więc w aplikacjach, gdzie dotychczas szeroko stosowano izolację proszkowo – próżniową. Superizolacja zostanie również zastosowana do termicznej izolacji bardzo dużych powierzchni niskotemperaturowych elementów wysokoenergetycznych akceleratorów cząstek elementarnych (LHC – Szwajcaria) czy też reaktorów termojądrowych (ITER - Francja) [12, 14, 74, 94].

Pomimo, iż wielowarstwowa izolacja próżniowa stosowana jest na skalę przemysłową od ponad 40 lat wciąż trwają prace nad poprawą jej efektywności i optymalizacją, czego wyrazem jest duża ilość prac poświęconych tematyce superizolacji [2, 3, 5, 6, 8, 9 – 12, 13, 14, 16 – 19, 21, 23 – 25, 27, 28, 31, 32, 34 – 36, 38, 42, 47 – 53, 55, 56, 60, 62 – 66, 68 – 71,

73, 76 – 93, 95 – 107, 113, 114, 116]. Szereg z nich ogranicza się jedynie do podania wyników pomiarów strumienia ciepła przenikającego przez taką izolację w zależności od podstawowych jej parametrów. Natomiast obecnie ważne jest, aby w fazie projektowania urządzeń i instalacji kriogenicznych możliwe było przewidzenie zachowania się i optymalizację takiej izolacji w danych warunkach jej pracy. W tym celu niezbędne jest wyznaczenie najważniejszych czynników mających wpływ na proces przenikania ciepła przez wielowarstwową izolację próżniową oraz, przy uwzględnieniu wytypowanych czynników, opracowanie modelu matematycznego opisującego ten proces.

Powierzchnie materiałów stosowanych jako ekrany radiacyjne wielowarstwowej izolacji próżniowej powinny charakteryzować się niską emisyjnością. Z technicznie dostępnych materiałów takie wymagania spełniają metale, a w szczególności: złoto, srebro, miedź i aluminium.

Początkowo, jako ekrany radiacyjne stosowano cienkie folie aluminiowe lub miedziane. Jednak ze względu na duży ciężar oraz tendencję do pękania i łamania się takich materiałów ekrany zaczęto wykonywać w postaci cienkich folii plastikowych pokrytych jedno lub dwustronnie cienką warstwą metalu refleksyjnego. Dzięki takiemu rozwiązaniu, ekonomiczne stało się zastosowanie powłok refleksyjnych wykonanych również z drogiego, charakteryzującego się bardzo niską emisyjnością materiału, jakim jest złoto [46].

Obecnie plastikową strukturę nośną ekranów radiacyjnych o grubości od 5- 75 μm wykonuje się na ogół z polietylenu tereftalanu (PETF) o handlowej nazwie Mylar®, rzadziej z droższych materiałów, na przykład z poliamidów o handlowych nazwach Kapton® i Dracon. Powlekanie folii odbywa się w procesie próżniowego naparowywania danego metalu na jej powierzchnię. Uzyskane w takim procesie powłoki mają grubość od 0.05 do 0.1 μm (500 – 1000 Å). Pewną wadą ekranów wykonanych z powlekanych folii jest ich nieco większa emisyjność niż w przypadku zastosowania ekranów z czystych metali. Ponadto powłoki o mniejszych grubościach (500 - 700 Å) są częściowo przezroczyste dla promieniowania cieplnego. W celu ułatwienia transportu gazu pomiędzy warstw izolacji w procesie wytwarzania próżni izolacyjnej w ekranach wykonuje się otwory, przy czym perforacja ekranów nie przekracza 0.5% ich powierzchni [46].

W przypadku ekranów jednostronnie pokrytych metalem, materiał folii nośnej sam jest dobrym izolatorem cieplnym, dzięki czemu stosowanie dodatkowych przekładek nie jest konieczne. Niekiedy również przekładek nie stosuje się przy ekranach obustronnie pokrytych metalem. W takich wypadkach ograniczenie przewodzenia ciepła pomiędzy poszczególnymi ekranami realizuje się przez wygniecenie lub odpowiednie wytłaczanie ekranów, co powoduje, iż kontakt pomiędzy poszczególnymi ekranami jest punktowy.

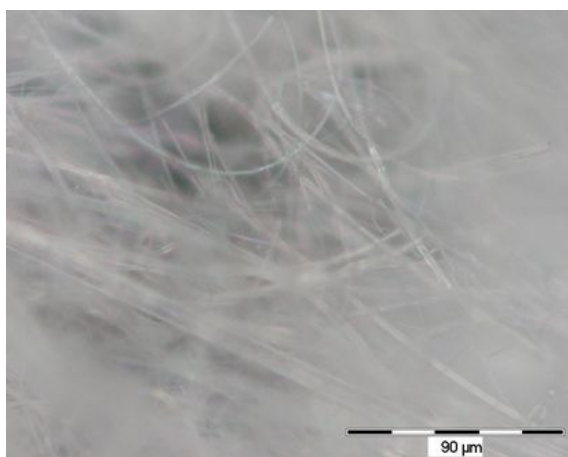
W chwili obecnej najpowszechniej stosowane bierne ekrany radiacyjne wykonuje się z Mylaru® obustronnie pokrytym aluminium. Wpływa na to kilka przyczyn: aluminium, w porównaniu ze złotem i miedzią, charakteryzuje się najmniejszą temperaturą parowania, przez co proces powlekania folii jest najtańszy. Dodatkowo, cienkie powłoki miedzi bardzo szybko ulegają korozji, powodują znaczny spadek zdolności odbijania promieniowania cieplnego takiej powierzchni. Aluminium natomiast początkowo pokrywa się warstwą tlenków uniemożliwiającej głęboką korozję tego materiału.

Niską przewodność cieplną przekładek rozdzielających ekrany radiacyjne superizolacji uzyskuje się zarówno przez dobór odpowiednich materiałów na ich wykonanie, jaki i przez odpowiednią konstrukcję takich elementów izolacji. Obecnie najpowszechniej stosuje się dwa typy przekładek: cienkie maty wykonanych ze sprasowanych włókien szklanych oraz siateczek plecionych z nici jedwabnych lub nylonowych [46]. Grubości przekładek wahają się o 75 do 750 μm . Zdjęcia obydwu typu przekładek przedstawia Rysunek 4.2.

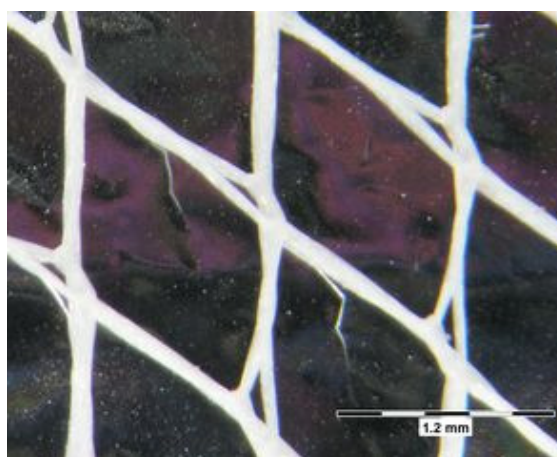
Włókna szklane, tworzące matę separacyjną ekranów radiacyjnych, mają średnicę od dziesiątych do kilku mikrometrów przy długości od kilkudziesięciu do kilkuset mikrometrów. Na rynku dostępnych jest kilka rodzajów mat separacyjnych: Tissueglass, Dexiglas, Pyrex, proponowanych przez różnych producentów, różniących się między sobą rodzajem materiału i wymiarami włókien szklanych. Przy wytwarzaniu mat izolacyjnych dąży się, aby ukierunkowanie położenia włókien w takim materiale było równoległe do powierzchni. Dzięki temu przewodzenie ciepła przez taką przekładkę odbywa się na wydłużonej drodze (włókna ustawione w kierunku prostopadłym skracają drogę przewodzenia ciepła przez przekładkę). Dodatkowo, obniżenie przewodzenia ciepła spowodowane jest bardzo małą powierzchnią styku pomiędzy poszczególnymi włóknami (styk punktowy). Przekładki wykonane z włókien szklanych charakteryzują się pewną zdolnością sorbowania gazów, dzięki czemu wspomagają procesy utrzymywania wysokich próżni izolacyjnych. Jest to szczególnie przydatna cecha, ponieważ materiał przekładki wiąże pewną ilość gaz nie w pełni usuniętego spomiędzy ekranów w procesie wytwarzania próżni izolacyjnej lub znajdującego się tam w wyniku odgazowania materiał ekranów. Wadą tego typu przekładek jest ich bardzo mała wytrzymałość mechaniczna, dlatego podczas instalacji wielowarstwowej izolacji próżniowej należy się z nimi obchodzić niezwykle ostrożnie, co znacznie wydłuża czas instalacji izolacji. Ze względu na opisane cechy przekładek wykonywanych z włókien szklanych nazywa się je niekiedy papierem szklanym lub papierem samopompującym

Drugim rodzajem często stosowanych przekładek są podwójnie plecione siateczki wykonane na ogół z bardzo cienkich nici jedwabnych lub nylonowych oraz rzadziej stosowane siateczki wykonane z Dacronu. Grubość takich przekładek waha się od 75 do 600 μm a rozmiary oczek siateczek od 1.5 do 3 mm. Tego typu przekładki nie charakteryzuje zdolność sorbowania gazów, ale ich kształt ułatwia proces ewakuacji gazu spomiędzy ekranów podczas wytwarzania próżni izolacyjnej. Po za tym kształt siateczki powoduje, iż kontakt pomiędzy przekładką a ekranami jest co najwyżej liniowy, a ponieważ rozmiary nici siateczki są niewielkie, powierzchnia kontaktu jest mała. Siateczki cechują bardzo dobre właściwości mechaniczne, dzięki czemu nie przysparzają większych trudności podczas instalacji izolacji, tak jak ma to miejsce w przypadku przekładek wykonanych z włókien szklanych.

a)



b)



Rysunek 4.2 Zdjęcia mikroskopowe materiałów do separacji ekranów radiacyjnych wielowarstwowej izolacji próżniowej, a) mata ze sprasowanych włókien szklanych (x100), b) siatka pleciona z nici nylonowych (x12.6) – fot. J. Poliński

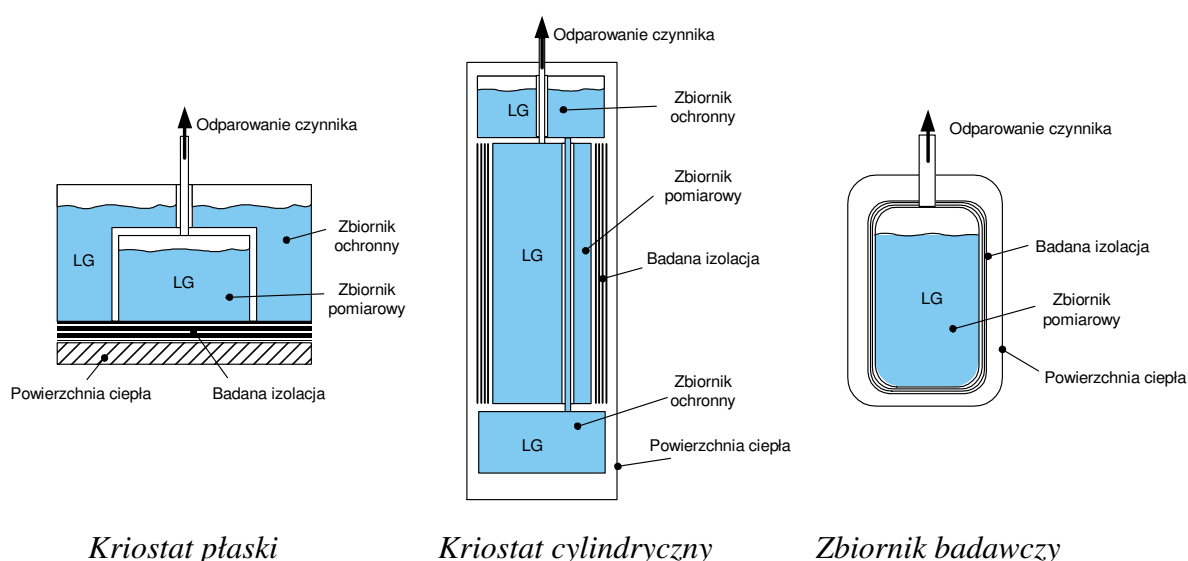
Spotyka się niekiedy rozwiązania polegające na zastosowaniu jednocześnie obydwóch wyżej opisanych typów przekładek, łącząc właściwości sorpcyjne włókien szklanych z wytrzymałością siateczek [46].

Proces pojedynczego nakładania poszczególnych warstw ekranów radiacyjnych oraz przekładek na izolowaną powierzchnię jest bardzo czasochłonne. W celu skrócenia czasu instalowania izolacji ekrany radiacyjne wraz z gotowo separującymi je przekładki są dostarczane od producenta w postaci rolek. Niekiedy ekrany i przekładki od razu tworzą pakiet kilku lub kilkunastu warstw a integralność pakietu uzyskuje się poprzez jego zszywanie za pomocą nici nylonowych. Takie rozwiązania ograniczają czas wykonywania izolacji głównie przy produkcji jednostkowej i małoseryjnej. W przypadku instalacji izolacji na dużych powierzchni o jednolitych gabarytach, ekonomicznie opłacalne jest wstępne wykonywanie pakietów izolacyjnych o dokładnie określonych gabarytach (długość, szerokość) oraz stosowanie rozwiązań przyspieszających łączenie krańców poszczególnych pakietów – zapięcia typu Velcro®. Niestety, jak wynika z prac Bendy [13, 12] i Boroskiego [17, 18, 16], rozwiązania przyspieszające proces instalowania ekranów wielowarstwowej izolacji próżniowej często pogarszają efektywność takiej izolacji.

4.1. Dane pomiarowe strumieni ciepła przepływających przez wielowarstwowe izolacje próżniowe

4.1.1. Stanowiska do badania przepływów ciepła przez wielowarstwową izolację próżniową.

Wyznaczanie strumienia ciepła przenikającego przez wielowarstwowe izolacje próżniowe wymaga stosowania specjalnych stanowisk pomiarowych, w których odtwarza się typowe warunki pracy takich izolacji. Do najczęściej spotykanych typów stanowisk badawczych można zaliczyć kriostaty płaskie, cylindryczne oraz zbiorniki badawcze. Schemat konstrukcji poszczególnych typów stanowisk przedstawia Rysunek 4.3.



Rysunek 4.3. Schematy stanowisk do badań kriogenicznych izolacji termicznych

Kriostat płaski składa się z płaskiej powierzchni ciepłej, na której umieszcza się próbkę badanej izolacji. Stałą temperaturę ciepłej powierzchni utrzymuje się za pomocą grzejnika elektrycznego. Zewnętrzna powierzchnia izolacji pozostaje w kontakcie cieplnym ze zbiornikiem badawczym, wypełnionym skroplonym gazem w stanie nasycenia, który stanowi powierzchnię zimną o stałej temperaturze. Zbiornik badawczy otoczony jest zbiornikiem ochronnym wypełnionym takim samym rodzajem skroplonego gazu. Ponieważ temperatura zbiornika ochronnego i badawczego jest taka sama, ciepło dopływa do zbiornika badawczego jedynie od ciepłej powierzchni po przez badaną izolację.

Kriostaty płaskie wykorzystuje się głównie do prowadzenia pomiarów efektywności wielowarstwowych izolacji próżniowych w zależności od stopnia kompresji warstw. Dzięki możliwości regulacji wysokości położenia powierzchni ciepłej możliwa jest zmiana stopnia kompresji warstw bez konieczności zapowietrzania, wygrzewania i otwierania stanowiska badawczego. Ponieważ w kriostatach o takiej konstrukcji próbka izolacji umieszczona jest poziomo, siły ciężkości powodują samo kompresję izolacji, przez co trudno jest zachować stały stopień kompresji warstw na wskroś grubości izolacji. Zjawisko to szczególnie mocno uwidacznia się przy stosowaniu dużej ilości warstw superizolacji. Inną wadą takich kriostatów jest nie w pełni oddany charakter normalnej pracy badanej izolacji – izolacja ma lepszy kontakt z powierzchnią ciepłą, osiągnięcie dobrego kontaktu z powierzchnią zimną wymaga wytworzenia pewnej kompresji warstw, izolacja w normalnych warunkach pracy nie powinna mieć jednoczesnego kontaktu z powierzchnią ciepłą i zimną.

Podobnych wad pozbawiane są kriostat cylindryczne. Próbka izolacji nawinięta jest na zbiornik badawczy pionowo, dzięki czemu siły ciężkości działają wzdłuż powierzchni izolacji i nie dochodzi do zjawiska samokompresji. Poza tym badana próbka izolacji ma dobry kontakt z powierzchnią zimną oraz nie dochodzi do równoczesnego kontaktu powierzchni próbki z powierzchnią ciepłą i zimną. Dodatkowo, w kriostatach cylindrycznych zbiorniki ochronne umieszczone nad i pod zbiornikiem pomiarowym blokują dopływ ciepła do krawędzi bocznej badanej izolacji, dzięki czemu taki fragment izolacji można traktować jako nieskończenie długi.

Wadą kriostatów cylindrycznych jest konieczność otwierania stanowiska badawczego przy każdorazowej zmianie konfiguracji (zmianie ilości warstw, zmianie kompresji warstw) badanej izolacji. Otwieranie kriostatu wymaga wygrzania urządzenia do temperatury otoczenia, zapowietrzenia przestrzeni próżniowej a po zmianie konfiguracji izolacji, długotrwałego procesu wytworzenia niskiego poziomu próżni oraz długiego czasu potrzebnego do uzyskania stabilnych warunków przepływu ciepła przez izolację po wypełnieniu zbiorników skroplonym gazem. Inną wadą omawianej konstrukcji jest dość duża czasochłonność instalacji izolacji na powierzchni zbiornika badawczego. Równocześnie uzyskiwanie równomiernego stopnia kompresji warstw na wskroś grubości izolacji jest bardzo trudne. Nie mniej jednak przy stosowaniu dużej ilości warstw na kriostatach cylindrycznych uzyskuje się lepszą równomierność kompresji warstw w porównaniu z kriostatami płaskimi – brak oddziaływań sił ciężkości.

Stosowania zbiorników wypełnionych skroplonym gazem do wyznaczania efektywności superizolacje jest stosunkowo rzadkie. Wynika to z dużej nieregularności geometrycznej powierzchni izolowanej, a co za tym idzie, niemożliwości uzyskania stałych parametrów (kompresji warstw) badanej izolacji. Dla przykładu: wartości zmierzonych strumieni ciepła przenikających badaną izolację uzyskanych na zbiorniku badawczym mogą być od 30% (dla małej ilości warstw) do nawet 300% (dla dużej ilości warstw) większe niż wartości uzyskane na kriostacie płaskim [10]. Z drugiej strony, wyniki pomiarów uzyskiwane zarówno na kriostatach płaskich jak i cylindrycznych odnoszą się do sytuacji wyidealizowanej, kiedy to instalacja izolacji oraz utrzymywanie stałej kompresji warstw jest niezwykle staranne a izolowane powierzchnie charakteryzują się niezmiennością geometryczną. Natomiast w rzeczywistych urządzeniach kriogenicznych często ma się do czynienia z nieregularnymi

powierzchniami a zapewnienie idealnych parametrów izolacji nakładanej na takie powierzchnie jest w zasadzie niemożliwe. Z tego względu pomiary skuteczności izolacji przeprowadzane na zbiornikach pomiarowych dają wyniki zbliżone do tych, jakich można się spodziewać w przemysłowych urządzeniach kriogenicznych.

Najdokładniejszą metodą określania przepływu ciepła przez badaną izolację jest metoda kalorymetryczna [106]. W metodzie tej ciepło dopływające przez badaną izolację do zbiornika pomiarowego powoduje odparowanie cieczy kriogenicznej wypełniającej zbiornik. Dzięki znanej wartości ciepła parowania danego czynnika kriogenicznego i pomiarom wartości objętościowego strumienia odparowanego gazu możliwe jest określenie strumienia ciepła przenikającego mierzoną izolację poprzez wykorzystanie następującej zależności:

$$\dot{Q} = q_{V_{rz}} \cdot \rho \cdot r \quad (4.1)$$

gdzie $q_{V_{rz}}$ jest rzeczywistym objętościowym strumieniem odparowanego gazu [m^3/s], ρ – gęstość gazu w temperaturze pomiaru strumienia przepływu [kg/m^3] a r – ciepłem parowania danej cieczy kriogenicznej [J/kg].

Strumień gazu opuszczający zbiornik pomiarowy nie jest całkowitą ilością gazu powstałą w zbiorniku na skutek odparowania cieczy. Wynika to z faktu, iż część par w zbiorniku pomiarowym wypełnia również przestrzeń, którą zajmowała odparowana ciecz. Różnice pomiędzy ilością gazu opuszczającą zbiornik a rzeczywistą ilością gazu powstałego na skutek odparowania cieczy są tym większe im mniejsza jest różnica pomiędzy gęstością cieczy a gęstością pary w temperaturze nasycenia. Dlatego przy określaniu rzeczywistej wartości strumienia objętościowego odparowanej cieczy na podstawie zmierzonego strumienia gazu opuszczającego zbiornik należy uwzględnić następującą poprawkę:

$$\dot{q}_{V_{rz}} = \dot{q}_{V_{pom}} \cdot \frac{\rho_L}{\rho_L - \rho_v} \quad (4.2)$$

gdzie $\dot{q}_{V_{pom}}$ jest mierzonym strumieniem gazu opuszczającym zbiornik [m^3/s], ρ_L – jest gęstością cieczy a ρ_v gęstością par czynnika w temperaturze nasycenia [kg/m^3].

Wartości poprawki, jaką należy uwzględnić w wyrażeniu (4.2) oraz ciepło parowania dla niektórych czynników kriogenicznych przedstawiono w Tabeli 4-1.

Tabela 4-1. Wartość poprawki jak należy uwzględnianej przy wyznaczaniu rzeczywistego strumienia parującego gazu (wyrażenie (4.2)) oraz ciepło parowania dla wybranych cieczy kriogenicznych

	<i>He</i>	<i>H₂</i>	<i>N₂</i>	<i>O₂</i>	<i>CH₄</i>
$\frac{\rho_L}{\rho_L - \rho_v}$	1,156	1,019	1,006	1,004	1,004
Ciepło parowania <i>r</i> [kJ/kg]	20,3	446,0	199,0	213,0	510,0

Jak wynika z Tabeli 4-1, w przypadku badań kalorymetrycznych z użyciem skroplonego helu, nieuwzględnienie wyżej opisanego zjawiska powoduje otrzymanie dużych rozbieżności (ponad 15% mierzonej wartości) pomiędzy wyznaczonym a rzeczywistym strumieniem ciepła dopływającym do zbiornika badawczego. Natomiast w przypadku stosowania innych czynników kriogenicznych otrzymywane różnice są pomijalnie małe i wahają się od 0.4% dla skroplonego tlenu i metanu do niespełna 2% dla wodoru.

Kolejną metodą, często stosowaną do wyznaczania strumienia ciepła przenikającego przez badaną próbkę izolacji, jest określanie mocy grzejnika elektrycznego utrzymującego stałą temperaturę powierzchni ciepłej. Jest to jednak metoda mniej dokładna niż metoda kalorymetryczna, ponieważ dokonanie zadawalająco precyzyjnego bilansu ciepła dla płyty ciepłej na ogół nie jest możliwe [106].

W technice wyznaczania efektywności izolacji termicznych stosowanych jest również kilka innych, mniej dokładnych metod pomiarowych. Jeden z nich polega na wyznaczaniu dyfuzyjności termicznej izolacji. W takiej metodzie izolacja umieszczona jest pomiędzy dwoma powierzchniami o stałej temperaturze. Po skokowej zmianie temperatury jednej z powierzchni wyznacza się dynamikę zmiany rozkładu temperatury na wskroś izolacji. Przy znanej gęstości i cieple właściwym materiału izolacji możliwe jest określenie współczynnika przewodzenia ciepła izolacji [106]. Metoda ta charakteryzuje się stosunkowo krótkim czasem pomiaru jednak otrzymywane wartości przewodności cieplnej obarczone są dużym błędem.

Inny interesujący sposób określanie strumienia ciepła przenikającego przez superizolację zaproponowali Mazzone i inni w [79]. Badaną izolację umieszczono na długim cienkościennym cylindrze wykonanym z miedzi o dużej czystości. Jeden koniec cylindra chłodzony był skroplonym kriogenem. Przy znanej przewodności cieplnej materiału cylindra oraz zmierzonym profilu temperatur wzdłuż powierzchni bocznej cylindra możliwe jest wyznaczenie strumienia ciepła przenikającego badaną izolację. Autorzy wskazują jednak na 10% błąd pomiaru wynikającego głównie z niedokładnej znajomości wartości współczynnika przewodzenia ciepła materiału cylindra oraz niedokładności pomiaru temperatury powierzchni cylindra [109].

4.1.2. Wyniki pomiarów strumieni ciepła przenikających przez wielowarstwową izolację próżniową.

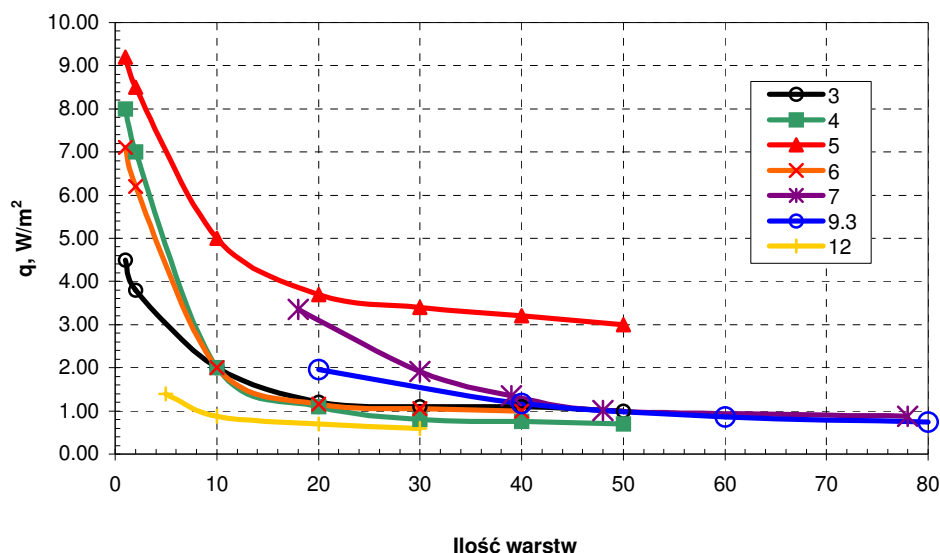
W literaturze [70, 62, 5, 98, 42, 73, 13] dostępne są wyniki pomiarów strumienia ciepła przenikającego przez wielowarstwową izolację próżniową. Wyniki te zostały zestawione na Rysunkach 4.4 – 4.8 a opis badanych izolacji zestawiono w Tabeli 4-2. Jak wynika z

Tabela 4-2 Opis wielowarstwowych izolacji próżniowych do Rysunków 4.4 – 4.8.

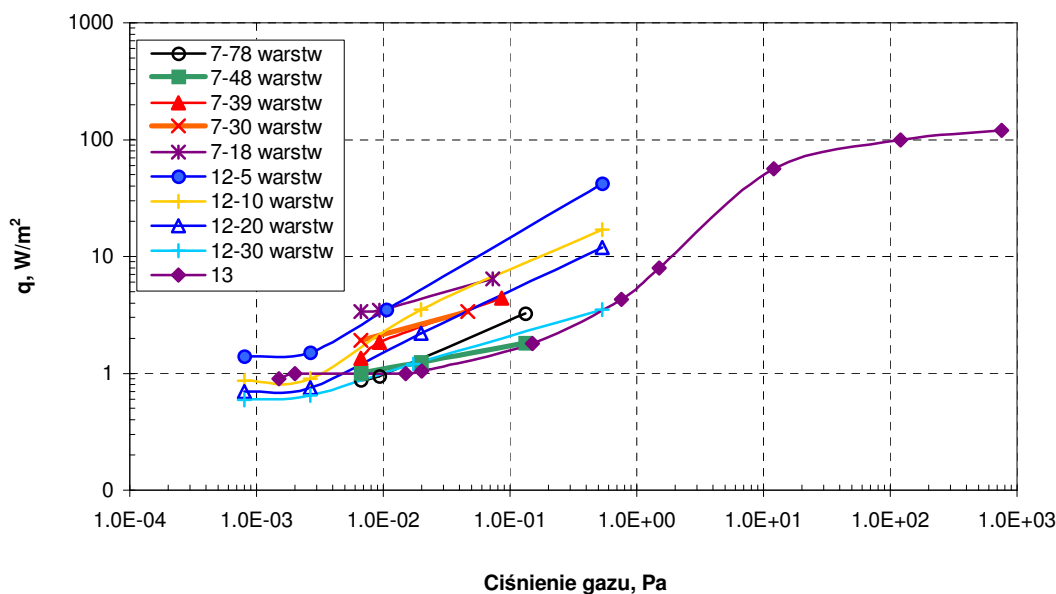
Nr	Opis izolacji	Autor
3	Lydall CRS - Folia aluminiowa 0.7 μm / włókno	[70]
4	Jehier IR 305 – DAM 6 μm , 400 Å, perforacja 0.1%/siateczka nylonowa 2x3 mmxmm	
5	NRC2 – Pognieciony SAM 6 μm	
6	IHI - Wytłaczany DAM 12 μm	
7	DAM 12 μm , perforacja 0.4%/siateczka nylonowa 80 μm	[62]
9.1	DAM 12mm/ włókno szklane76.2 μm – 63.28 warstw/cm	[5]
9.2	DAM 12mm/ włókno szklane76.2 μm – 50 warstw/cm	
9.3	DAM 12mm/ włókno szklane76.2 μm – 30 warstw/cm	
9.4	DAM 12mm/ włókno szklane76.2 μm – 24.2 warstw/cm	
12	NRC2 – Pognieciony SAM μm	[98]
13	Jehier IR 305 – DAM 6 μm , 400 Å, perforacja 0.1%/siateczka nylonowa 2x3 mmxmm	[42]
14	Pojedyncza warstwa DAM 25mm, 250A	[73]
15	DAM 25 μm , 250A/siateczka 30 μm , 4x5 mmxmm	
16	DAM 6 μm , 400A /siateczka 6 μm	
17	DAM 8 μm , 230A/CRYOTHERM 2330 60 μm	[13]
18	DAM 8 μm , 230A/SYNTRA 5507 90 μm	
19	Al 11 μm , 230A/CRYOTHERM 2330 60 μm	

przedstawionych danych na skuteczność izolacji wpływa przede wszystkim ilość zastosowanych warstw ekranów radiacyjnych, ciśnienie i rodzaj gazu rezydualnego wypełniającego przestrzeń próżniową, stopień kompresji ekranów radiacyjnych oraz zakres temperatur pracy izolacji.

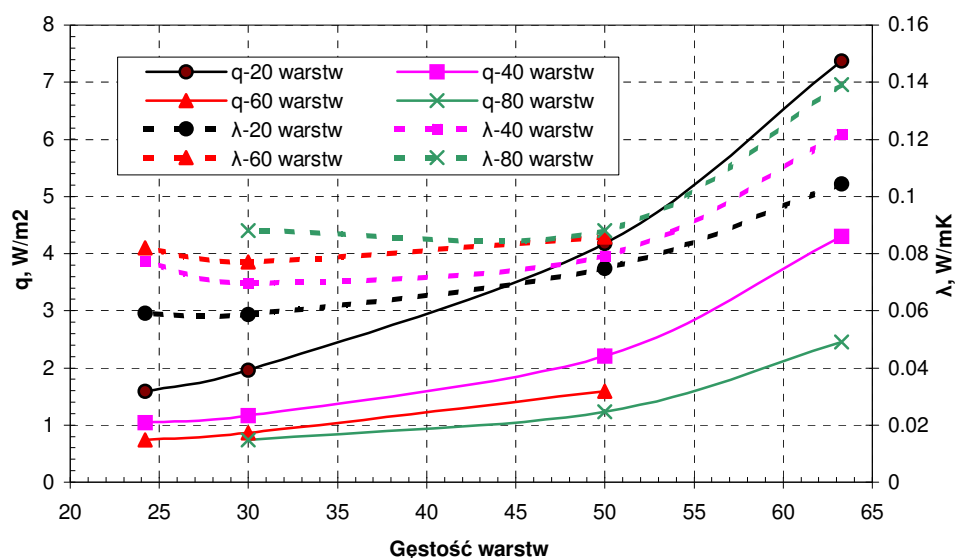
Szczegółowy opis badanych izolacji wraz z wynikami pomiarów podano w Załączniku A (dla zakresu temperatur 300 – 77.3 K - Tabela A-1; dla zakresu temperatur 77.3 – 4.2 K - Tabela A-2).



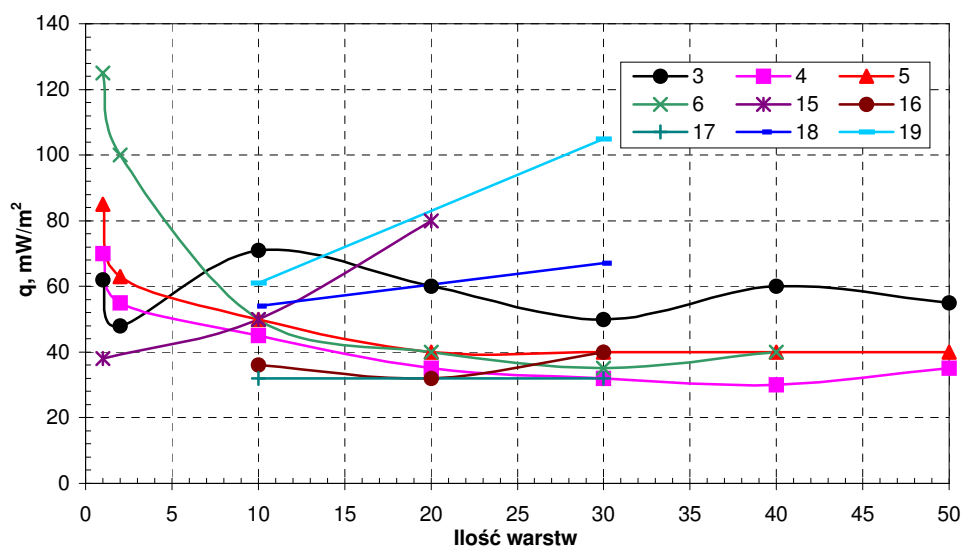
Rysunek 4.4 Strumień ciepła przenikający przez wielowarstwowe izolacje próżniowe w zależności od ilości zastosowanych warstw przy dobrych warunkach próżniowych dla zakresu temperatur 300 – 77.3 K – opis poszczególnych izolacji przedstawiono w Tabeli 4-2.



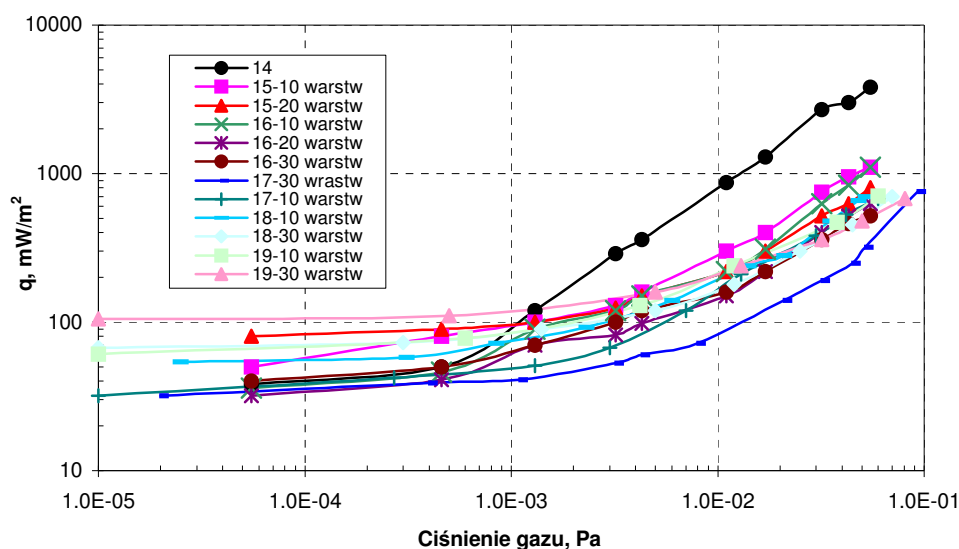
Rysunek 4.5 Strumień ciepła przenikający przez wielowarstwowe izolacje próżniowe w zależności od ciśnienia gazu resztkowego dla zakresu temperatur 300 – 77.3 K. Gaz resztkowy N_2 – opis poszczególnych izolacji przedstawiono w Tabeli 4-2.



Rysunek 4.6 Strumień ciepła przenikający przez wielowarstwowe izolacje próżniowe (izolacje nr 9.1 – 9.4 Tabela 4-2) oraz współczynnik przewodzenia ciepła λ tych izolacji w zależności od gęstości warstw dla różnej ilości zastosowanych warstw przy dobrych warunkach próżniowych. Zakres temperatur 300 – 77.3 K – opis poszczególnych izolacji przedstawiono w Tabeli 4-2.



Rysunek 4.7 Strumień ciepła przenikający przez wielowarstwowe izolacje próżniowe w zależności od ilości zastosowanych warstw przy dobrych warunkach próżniowych dla zakresu temperatur 77.3 – 4.2 K – opis poszczególnych izolacji przedstawiono w Tabeli 4-2.



Rysunek 4.8 Strumień ciepła przenikający przez wielowarstwowe izolacje próżniowe w zależności od ciśnienia gazu resztkowego dla zakresu temperatur 77.3 – 4.2 K. Gaz resztkowy He – opis poszczególnych izolacji przedstawiono w Tabeli 4-2.

Z Rysunku 4.4 wynika, że dla zakresu temperatur pracy izolacji 300 – 77.3 K, przy dobrych warunkach próżniowych (ciśnienie niższe od $1 \cdot 10^{-3}$ Pa), zwiększanie ilości warstw ekranów radiacyjnych wielowarstwowej izolacji próżniowej zawsze powoduje ograniczenie ciepła przenikającego przez izolację, przy czym największy spadek strumienia ciepła obserwuje się przy ilości ekranów nie przekraczającej 20. Przy zastosowaniu ponad 20 warstw ekranów radiacyjnych poprawa efektywności izolacji jest znacznie słabsza.

Istotny wpływ na właściwości superizolacji, jak wynika z Rysunku 4.5, ma również poziom próżni. Jeżeli ciśnienie gazu w przestrzeni próżniowej jest niższe niż $1 \cdot 10^{-3}$ Pa, to dalsze obniżanie ciśnienia nie powoduje poprawy efektywności izolowania. Natomiast wraz ze wzrostem ciśnienia gazu powyżej poziomu $1 \cdot 10^{-3}$ Pa obserwuje się zwiększenie ilości ciepła przepływającego przez izolację i począwszy od $1 \cdot 10^{-2}$ Pa wzrost ten jest proporcjonalny do ciśnienia gazu.

Kolejnym parametrem wpływającym na efektywność izolacji wielowarstwowej jest kompresja warstw ekranów radiacyjnych, wyrażona przez ilość warstw na centymetr grubości utworzonej izolacji. Wpływ kompresji warstw został zbadany przez Bapata i innych [5]. Rysunek 4.6 pokazuje, że wraz ze wzrostem gęstości warstw, niezależnie od ilości zastosowanych warstw ekranów radiacyjnych, skuteczność wielowarstwowej izolacji próżniowej maleje. Jest to wynikiem poprawy przekazywania ciepła pomiędzy ekranami i przekładkami lub, w przypadku braku przekładek, samymi ekranami, na skutek zmniejszenia oporu przekazywania ciepła pomiędzy tymi powierzchniami w miejscach ich wzajemnego kontaktu. Drugą przyczyną jest zmniejszenie powierzchni przekroju przestrzeni międzywarstwowej, co podczas procesu wytwarzania próżni utrudnia ewakuację gazu spomiędzy ekranów. W takim przypadku ciśnienie gazu rezydualnego wypełniającego przestrzeń międzywarstwową może być znacznie większe niż w samej przestrzeni próżniowej.

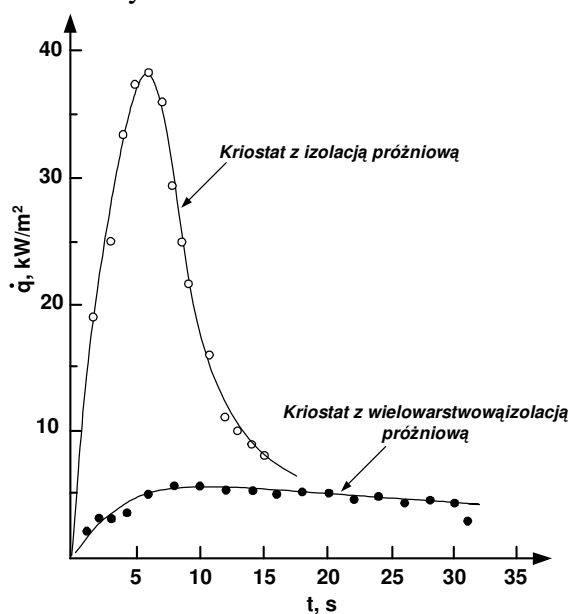
Z danych przedstawionych na Rysunku 4.4 wynika, że w zakresie temperatur 300 – 77.3 K strumień ciepła przepływający przez dobrze wykonaną wielowarstwową izolację próżniową jest rzędu $0.8 - 1 \text{ W/m}^2$.

Na rysunkach 4.7 i 4.8 pokazano wyniki pomiarów strumieni ciepła przepływających przez wielowarstwową izolację próżniową w zakresie temperatur 77.3 – 4.2 K. W świetle wyników badań prezentowanych przez Kumara i innych [70] można przyjąć, iż skuteczność

izolacji w takim zakresie temperatur poprawia się wraz ze zwiększaniem ilości stosowanych warstw – rysunek 4.7. Natomiast wyniki pomiarów przedstawione przez Lebruna i innych [73] oraz przez Bende i innych [13] wskazują, iż zwiększenie ilości warstw izolacji z 10 na 20 i 30 bądź nie zmienia właściwości izolacji bądź wręcz właściwości te ulegają pogorszeniu.

Stosując wielowarstwową izolację próżniową w zakresie temperatur 77.3 – 4.2 K strumienie ciepła ulegają ograniczeniu do 30 - 100 mW/m², przy czym ciśnienie gazu w przestrzeni próżniowej takiej izolacji nie powinno przekraczać $1 \cdot 10^{-4}$ Pa – rys. 4.8.

Przy stosowaniu każdej izolacji próżniowej, szczególnie niebezpieczna jest nagła utrata próżni spowodowana np. uszkodzeniem zewnętrznego płaszcza lub wewnętrznego zbiornika ze skroplonym gazem. Występujące w takiej sytuacji duże dopływy ciepła do wewnętrznych zbiorników ze skroplonymi kriogenami mogą doprowadzić do bardzo szybkiego wzrostu ciśnienia w izolowanych objętościach, skutkiem czego może dojść do eksplozji urządzenia lub instalacji kriogenicznej. Lehmann i Zahn określili doświadczalnie wartości strumienia ciepła dopływającego do objętości wypełnionych skroplonym helem w sytuacji nagłej degradacji próżni przez powietrze wpływające z otoczenia do przestrzeni próżniowej [75]. Wyniki pomiarów przepływu ciepła przez zdegradowane izolacje próżniową i wielowarstwową przedstawiono na Rysunku 4.9.



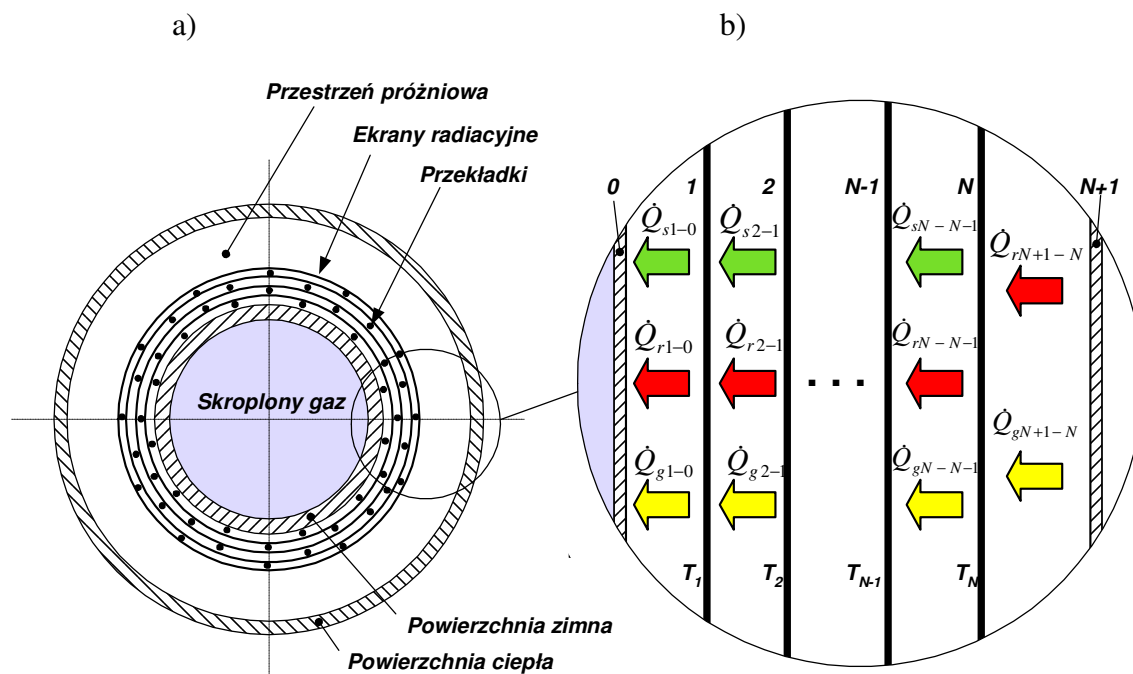
Rysunek 4.9 Wyniki pomiarów [75] strumienia ciepła dopływających do objętości helowych przy nagłej utracie próżni izolacyjnej. Izolacja degradowana powietrzem atmosferycznym.

W przypadku nagłej utraty próżni izolacyjnej ilość ciepła docierającego do zbiorników helowych przy obecności superizolacji jest rzędu 5 kW/m², a zmiana wartości strumienia ciepła w czasie jest niewielka. Dla porównania, przy izolowaniu zbiornika helowego izolacją próżniową nagła utrata próżni powoduje bardzo silny i ziemny w czasie dopływ ciepła do izolowanej objętości, przy czym maksymalna wartość strumienia ciepła jest bliska 40 kW/m². Lebrun i inni [74] oraz Harrison [59] w prowadzonych przez siebie badaniach o podobnym charakterze uzyskali wyniki potwierdzające wartości strumieni ciepła otrzymane przez Lehmana i Zahna.

4.2. Analiza przepływu ciepła przez wielowarstwową izolację próżniową.

Wielowarstwowej izolacji próżniowej charakteryzuje się dużą anizotropią przewodzenia ciepła. W kierunku równoległym do powierzchni izolacji ciepło jest bardzo dobrze przewodzone wzdłuż ekranów radiacyjnych, podczas gdy w kierunku prostopadłym do powierzchni izolacji przepływ ciepła jest mocno ograniczony. Z tego względu wielowarstwową izolację próżniową można traktować jako strukturę utworzoną przez pewną ilość powierzchni izotermicznych.

W procesie przenikania ciepła przez tak utworzoną izolację, schematycznie przedstawionym na Rysunku 4.10 b), uczestniczy promieniowanie ciepła, przewodzenie ciepła przez gaz oraz przepływ ciepła przez ciała stałe. W obrębie poszczególnych warstw ekranów ciepło przenika przy uczestnictwie wszystkich trzech wymienionych mechanizmów, natomiast pomiędzy zewnętrznym ekranem a powierzchnią ciepłą izolacji, gdzie nie dochodzi do wzajemnego kontaktu obydwu powierzchni, ciepło jest wymieniane jedynie przez gaz resztkowy oraz promieniowanie ciepłe.



Rysunek 4.10. a) Przykład zastosowania izolacji wielowarstwowej; b) schemat mechanizmu przenikania ciepła przez izolację wielowarstwową; Q_g – przewodzenie ciepła przez gaz resztkowy; Q_r – promieniowanie ciepła, Q_s – przewodzenie przez materiał przekładki; $N, N-1, \dots, 1$ - kolejne ekrany radiacyjne; $T_N, T_{N-1}, \dots, T_1$ temperatury kolejnych ekranów.

Jak wskazują wyniki pomiarów ilości ciepła przenikającego przez superizolację omówione w punkcie 4.1.2, w prawidłowo działającej wielowarstwowej izolacji próżniowej ciśnienie gazu w przestrzeni próżniowej powinno być niższe niż 10^{-3} Pa. Przy takim ciśnieniu, zgodnie z wyrażeniem (2.7), droga swobodna cząsteczek gazu w średniej temperaturze 150 K waha się, w zależności od rodzaju gazu, od 6.5 m dla pary wodnej do 36 m dla helu. Natomiast w praktyce odległość pomiędzy zewnętrznym ekranem radiacyjnym a ciepłą powierzchnią izolacji nie przekracza kilku centymetrów, a odległości pomiędzy poszczególnymi ekranami są rzędu 0.5 mm. Ponieważ droga swobodna gazów w takich warunkach próżniowych znacznie przekracza typowe odległości pomiędzy powierzchniami wymieniającymi ciepło to proces ten odbywa się w warunkach molekularnych. Dla takich

warunków ilość ciepła wymieniana przez gaz może być określona z wyrażenia (2.8), pierwotnie zaproponowanego przez Knudsen:

$$\dot{Q}_g = F \cdot \left(\frac{R_u}{8\pi T_0 M_0} \right)^{0.5} \frac{\kappa+1}{\kappa-1} \frac{\alpha}{2-\alpha} p \cdot (T_2 - T_1) \quad (4.3)$$

Ponieważ, jak przedstawiono w Tabeli 2-2, dla powietrza i azotu oraz dla gazów w niskich temperaturach wartość współczynnika akomodacji zbliżony jest do 1, w literaturze [6, 80, 82] można odnaleźć zależność do wyznaczenia ilości ciepła przewodzonego przez gaz resztkowy, w którym wyraz $\frac{\alpha}{2-\alpha}$ we wzorze (2.8) zastępowany jest przez α , czyli średni współczynnik akomodacji. Corruccini [30] do określania strumienia ciepła przewodzonego przez gaz w warunkach molekularnych proponuje korzystanie z wyrażenia:

$$\dot{Q}_g = F \cdot C \cdot \alpha \cdot p (T_1 - T_2), \quad (4.4)$$

w którym wartość stałej C podawane jest w zależności od rodzaju gazu oraz jego temperatury.

Przy stosowaniu termicznych izolacji próżniowych, w tym superizolacji, należy liczyć się z możliwością samoczynnej degradacji próżni wynikającej z odgazowania materiałów umieszczonych w przestrzeni próżniowej, dyfuzji gazów przez powierzchnie ograniczające tę przestrzeń oraz na skutek przecieków gazów przez nieszczelności na połączeniach poszczególnych elementów instalacji i urządzeń kriogenicznych. W takich sytuacjach warunki wymiany ciepła przez gaz mogą zmienić swój charakter z molekularnych na przejściowy lub, w przypadku mocno zdegradowanej próżni, na lepki.

Z powyższych względów przy określaniu strumienia ciepła wymienianego przez gaz pomiędzy dwoma powierzchniami bardziej odpowiednie wydaje się wykorzystanie zależności, która uwzględniałaby wszystkie trzy charakterystyczne warunki, w jakich może zachodzić ten mechanizm. Wyrażenie takie można uzyskać przez podstawienie zależności (2.6) oraz (2.7) do wyrażenia (2.5):

$$\dot{Q}_g = F \cdot \frac{1}{N_a \cdot d_0^2} \left(\frac{R_u}{\pi} \right)^{1.5} \frac{9\kappa-5}{4(\kappa-1)} \left(\frac{T_{sr}}{M_0} \right)^{0.5} \frac{1}{L + \frac{9\kappa-5}{\kappa+1} \frac{2-\alpha}{\alpha} \frac{k_B}{\pi\sqrt{2}d_0^2} \frac{T_{sr}}{p}} (T_1 - T_2) \quad (4.5)$$

Ponieważ w technice kriogenicznej powierzchnie wymieniające ciepło w przeważającej mierze mają kształt cylindryczny, wzór (4.5) dla przypadku wymiany ciepła pomiędzy dwoma współosiowymi powierzchniami cylindrycznymi o średnicach d_1 i d_2 ($d_1 > d_2$) przyjmuje postać:

$$\dot{Q}_g = \frac{1}{N_a \cdot d_0^2} \left(\frac{R_u}{\pi} \right)^{1.5} \frac{9\kappa-5}{4(\kappa-1)} \left(\frac{T_{sr}}{M_0} \right)^{0.5} \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{d_1}{d_2}\right) + \frac{2}{d_2} \frac{9\kappa-5}{\kappa+1} \frac{2-\alpha}{\alpha} \frac{k_B}{\pi\sqrt{2}d_0^2} \frac{T_{sr}}{p}} (T_1 - T_2) \quad (4.6)$$

Przewodzenie ciepła przez materiał przekładki umieszczonej pomiędzy dwoma sąsiadującymi ekranami radiacyjnymi wielowarstwowej izolacji próżniowej jest procesem skomplikowanym. Ciepło przejmowane jest przez przekładkę w miejscach wspólnego styku od ekranu o wyższej temperaturze, następnie przewodzone przez przekładkę i finalnie, również w miejscach wzajemnego kontaktu, przekazane od przekładki do ekranu o temperaturze niższej. Sposób przewodzenia ciepła w obrębie materiału przekładki uzależniony jest od jej budowy. W przekładkach wykonanych w postaci mat ze sprasowanych włókien szklanych ciepło przewodzone jest wzdłuż włókien a wymiana ciepła pomiędzy poszczególnymi włóknami odbywa się w miejscu ich wzajemnego styku. Ze względu na bardzo małe średnice przekroju porzecznego stosowanych włókien, ich znacznej długości w stosunku do średnicy oraz stosunkowo niewielkiej przewodności materiałów włókien, znacznemu ograniczeniu ulega przewodzenie ciepła. Również powierzchnia kontaktu, na której odbywa się wymiana ciepła pomiędzy poszczególnymi włóknami, jest niewielka. Natomiast w przekładkach wykonywanych w postaci siateczek ciepło odbierane w miejscu styku przekładki z ekranem przewodzone jest wzdłuż nici siateczki a następnie przekazywane do drugiej nici w punkcie wzajemnego kontaktu.

Ilość ciepła przewodzonego przez materiał przekładki znajdujące się pomiędzy dwoma ekranami radiacyjnymi o temperaturach T_1 i T_2 ($T_1 > T_2$) można określić ze zależności Fouriera:

$$\dot{Q}_s = F \cdot k_s \cdot (T_1 - T_2) \quad (4.7)$$

Parametr k_s [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$] w wyrażeniu (4.7) jest przewodnością przekładki z uwzględnieniem przewodności cieplnej w miejscach kontaktu przekładki i ekranów radiacyjnych:

$$k_s = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda_s} + \frac{1}{h_2}} \quad (4.8)$$

gdzie h_1, h_2 – przewodność cieplna na powierzchni kontaktu ekran – przekładka [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$], δ – grubość przekładki [m], λ_s – współczynnik przewodzenia ciepła materiału przekładki [W/mK].

Dla układu cylindrycznego ($d_1 > d_2$) wyrażanie przyjmuje postać:

$$\dot{Q}_s = \frac{\pi \cdot l}{\frac{1}{d_1 \cdot h_1} + \frac{2}{\lambda_s} \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) + \frac{1}{d_2 \cdot h_2}} \cdot (T_1 - T_2) \quad (4.9)$$

gdzie l – długość krawędzi bocznej przekładki [m], d_1, d_2 – średnica zewnętrzna i wewnętrzna przekładki [m] oraz:

$$d_1 = d_2 + 2 \cdot \delta \quad (4.10)$$

Natomiast w przypadku braku materiału separującego przewodzenie ciepła pomiędzy sąsiadującymi ekranami radiacyjnymi ograniczona jest jedynie oporem cieplnym kontaktu pomiędzy dwoma ekranami. Dla takich warunków w wyrażeniu (4.7):

$$k_s = h_0 \quad (4.11)$$

gdzie h_0 [W/m²K] jest przewodnictwem ciepła na powierzchni kontaktu dwóch ekranów.

W najprostszym ujęciu ilość ciepła wymienianego na drodze promieniowania pomiędzy dwoma powierzchniami równoległymi o temperaturze T_1 i T_2 można określić na podstawie wyrażenia (2.9):

$$\dot{Q}_r = F \cdot \sigma \cdot \varepsilon' \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (4.12)$$

gdzie emisyjność zastępcza ε' dla układu równoległego wynosi:

$$\varepsilon' = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (4.13)$$

a ε_1 i ε_2 oznaczają odpowiednio emisyjność powierzchni o temperaturze T_1 i T_2 .

Dla układu cylindrycznego ($d_2 > d_1$, $T_2 > T_1$) wyrażenie (4.12) przyjmuje postać:

$$\dot{Q}_r = \sigma \cdot \frac{\pi \cdot d_1 l}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{d_1}{d_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (4.14)$$

Określanie radiacyjnego strumienia ciepła wymienianego pomiędzy dwoma powierzchniami przy użyciu powyższych zależności odnosi się do przypadku, w którym pomiędzy rozpatrywanymi powierzchniami nie znajduje się żadna substancja (ciało stałe, ciecz, gaz) mogąca absorbować promieniowanie cieplne. W wielowarstwowej izolacji próżniowej taka sytuacja występuje przy wymianie ciepła pomiędzy skrajnym ekranem radiacyjnym a powierzchnią zamykającą przestrzeń próżniową oraz przy wymianie ciepła pomiędzy ekranami radiacyjnymi w przypadku braku materiału separującego. Jeżeli natomiast ekrany radiacyjne są oddzielone przekładką, należy uwzględnić jej wpływ na proces wymiany ciepła pomiędzy ekranami na drodze promieniowania.

Z charakteru zjawiska promieniowania cieplnego wiadomo, że powierzchnie ciał stałych częściowo pochłaniają, częściowo odbijają oraz częściowo przepuszczają promieniowanie cieplne. Ciało stałe nie jest przezroczyste dla promieniowania, jeżeli jego grubość jest większa od głębokości optycznej, charakteryzującej zdolność penetracji ciała stałego przez falę elektromagnetyczną transportującą ciepło. Metale absorbują promieniowanie w warstwie powierzchni o grubości równej ułamka mikrometra. Natomiast materiały będące izolatorami elektrycznymi mogą być penetrowane przez promieniowanie nawet do głębokości rzędu milimetra [112]. Z tych względów przyjmuje się, że cienka warstwa aluminium pokrywająca ekrany radiacyjne nie jest przepuszczalna dla promieniowania. Natomiast materiały separujące ekrany radiacyjne, które są również dobrymi izolatorami prądu elektrycznego, a ich grubości na ogół nie przekraczają 0.5 mm, mogą być częściowo przezroczyste dla promieniowania cieplnego.

Tien i Cunningham [32, 106] proponują uwzględnienie wpływu obecności przekładek na wymianę ciepła pomiędzy sąsiadującymi ekranami poprzez wprowadzenie do wzoru (4.12) współczynnika załamania promieniowania n :

$$\dot{Q}_r = F \cdot \sigma \cdot n^3 \cdot \varepsilon' \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (4.15)$$

Autorzy zwracają uwagę, iż przekładki wykonanych w postaci siateczek zakrywają jedynie do 10% powierzchni ekranów radiacyjnych. Z tego względu dla takiego przypadku proponują przyjęcie wartości współczynnika załamania $n=1$, a więc nieuwzględnianie obecności takich przekładek przy wymianie ciepła na drodze promieniowania. Natomiast dla przekładek wykonywanych w postaci mat ze sprasowanych włókien szklanych w wyrażeniu (4.15) przyjmują wartość współczynnika załamania promieniowania $n=1.14$.

Zachowanie anizotropii struktury wielowarstwowej izolacji próżniowej wymaga osobnego nakładania poszczególnych ekranów radiacyjnych i przekładek na izolowaną powierzchnię. W przypadku powierzchni izolowanych o kształcie cylindrycznym każdorazowo należy łączyć skrajne krawędzie poszczególnych warstw, na ogół za pomocą cienkiej, aluminiowej taśmy samoprzylepnej. Wadą takiej metody instalowania izolacji jest jej duża czasochłonność. W celu przyspieszenia procesu nakładania izolacji ekrany radiacyjne przełożone materiałem przekładki łączy się wstępnie, tworząc pakiet izolacyjny. Integralność pakietu uzyskuje się na ogół przez zastosowanie szwów nićmi nylonowymi. Jednak nici stanowią dodatkową drogę dla przepływu ciepła w kierunku prostopadłym do powierzchni warstw, przez co miejscowo pogarsza się skuteczność superizolacji. Wpływ ilości oraz rodzaju zastosowanego szwu badali Boroski i inni [16] oraz Benda i inni [12]. Pomiary dokonane przez Boroskiego i innych przeprowadzono w zakresie temperatur 77.3 – 20 K a badaniu poddano dwa sposoby szycia – punktowy i ciągły. W przypadku szwów punktowych nie zaobserwowano znaczącego wpływu takiego sposobu tworzenia pakietu izolacyjnego na skuteczność izolacji, natomiast szew ciągły pogorszył właściwości izolacji nawet o 40%. Benda i inni przeprowadzili badania w zakresie temperatur 77.3 – 4.2 K dwóch pakietów izolacyjnych, z czego pierwszy posiadał pewną standardową ilość szwów ciągłych, natomiast drugi o sześć szwów więcej. Przedstawione wyniki pomiarów wskazują, że zastosowanie dodatkowych szwów ciągłych jedynie w sposób nieznaczny pogorszyło właściwości pakietu izolacyjnego. Benda, porównując wyniki otrzymane przez Boroskiego, zwraca uwagę, iż długość szwów potrzebna na dobrą integrację pakietu izolacyjnego w zasadzie słabo zależy od powierzchni pakietu. Ponieważ badania Benda były przeprowadzone na kriostacie o powierzchni pomiarowej blisko 10-o krotnie większej niż w przypadku badań Boroskiego, wpływ dodatkowo zastosowanych szwów na właściwości całej izolacji był słabo zauważalny. Z tego względu rozwiązanie polegające na wstępnym tworzeniu pakietu izolacyjnego stosuje się głównie w przypadku izolowania powierzchni o dużych gabarytach, gdzie tworzenie pakietów znacznie przyspiesza proces instalacji izolacji, a ilość ciepła dodatkowo przewodzona przez nici w stosunku do całkowitej ilości ciepła przenikająca przez izolację jest pomijalnie mała.

Inna metoda nakładania izolacji polega na nawijaniu na powierzchnię izolowaną długiego pasa złożonego z jednej warstwy ekranu radiacyjnego oraz jednej warstwy przekładki tworząc odpowiednią ilość warstw izolacyjnych. Metoda ta jest mniej czasochłonna niż osobne nakładanie poszczególnych warstw izolacji, jednak wymaga dostatecznie dobrego dostępu do izolowanej powierzchni. Ze względu na specyfikę konstrukcji urządzeń kriogenicznych warunek ten jest często trudny do spełnienia. Jednak główną wadą takiego rozwiązania jest doprowadzanie do obszaru izolowanego dodatkowego strumienia ciepła przewodzonego przez materiał ekranu radiacyjnego, a tym samym pogorszenie skuteczności izolacji. Wpływ metody instalacji superizolacji na izolowanej powierzchni w zakresie temperatur 300 – 77.3 K jest tematem pracy Amano i innych [2]. Wykazali oni, iż ilość dodatkowego ciepła, jakie jest przewodzone przez materiał ekranu radiacyjnego, zależy od ilości utworzonych warstw. Dla 40 i 50 osobno nakładanych warstw izolacji zmierzony strumień ciepła wynosił odpowiednio 1.7 i 1.4 W/m², podczas gdy dla takich samych ilości warstw izolacji utworzonej przez nawinięcie pasa ekranu radiacyjnego strumień ciepła wynosił odpowiednio 2.1 i 1.8 W/m². Negatywny wpływ przewodzenia ciepła po materiale ekranu można wyeliminować poprzez

wzdłużna rozcięcie nawiniętej izolacji i pokrycia rozcięcia aluminiową taśmą samoprzylepną lub dodatkową warstwą radiacyjną. W tak nawiniętej i zmodyfikowanej superizolacji również można przyjąć, iż poszczególne warstwy stanowią powierzchnie izotermiczne a uzyskana skuteczność takiej izolacji w zasadzie nie odbiega od właściwości superizolacji nałożonej na powierzchnię izolowaną warstwa po warstwie [97, 99, 100, 102, 113].

Kolejnym czynnikiem mogącym wpłynąć na skuteczność wielowarstwowej izolacji próżniowej jest stopień perforacji ekranów radiacyjnych. Wykonywanie niewielkich otworów w ekranach radiacyjnych poprawia ewakuację gazu z przestrzeni międzywarstwowej izolacji, dzięki czemu obniża się ciśnienie gazu rezydualnego, a co za tym idzie, skuteczność całej izolacji. Z drugiej strony przez otwory w ekranach przepływa większa ilość promieniowania cieplnego, co pogarsza właściwości izolacji. Chen i inni w [23] przez analizę teoretyczną i badania eksperymentalne określili optymalną wartość stopnia perforacji ekranów radiacyjnych wynoszącą $\zeta=0.28\%$. Również Zhitomirskij i inni [116] badając superizolacje o różnym stopniu perforacji najmniejsze wartości przepływającego ciepła uzyskali dla $\zeta=0.31\%$.

Istotny wpływ na efektywność superizolacji ma również orientacja powierzchni izolowanej. Jeżeli cylindryczna powierzchnia izolowana ułożona jest poziomo, w wyniku działania sił ciężkości warstwy izolacji znajdujące się na górze podlegają samokompresji, przez co strumień ciepła przenikająca taką izolację w tym miejscu ulega intensyfikacji. Natomiast materiał izolacji w dolnej części może zwisać swobodnie i na pewnej części obwodu nie stykać się z powierzchnią izolowaną. Zmiana efektywności superizolacji nałożonej na powierzchni poziomej w porównaniu z izolowaniem powierzchni pionowej jest przedmiotem kilku prac Ohmori [85]. Z przedstawionych analiz wynika, że na kompresję izolacji w górnych partiach izolacji mają wpływ dwa czynniki: ciężar właściwy materiałów izolacyjnych oraz parametr S^* będącym stosunkiem różnicy długość izolacji i obwodu izolowanej powierzchni do obwodu powierzchni. W sytuacji, kiedy dąży się do kontaktu izolacji z powierzchnią izolowaną na całym obwodzie (izolacja nie zwisa pod powierzchnią izolowaną), niezbędna jest pewna dodatkowa siła naciągu izolacji. Siła naciągu dodatkowo zwiększa kompresję warstw w górnych partiach izolacji. Zmniejszanie siły naciągu izolacji, a więc zwiększanie długości izolacji powoduje zmniejszenia kompresji górnych partii izolacji wywołanych tą siłą oraz, w dolnych partiach, zmniejszenie powierzchni kontaktu pomiędzy izolacją a powierzchnią izolowaną (dochodzi do zwisu izolacji). Natomiast zwiększanie długości izolacji powoduje również wzrost ciężaru izolacji, a więc i wzrost kompresji izolacji w górnych partiach na skutek oddziaływań sił ciężkości. Ohmori wskazał, iż optymalna wartość parametru S^* wynosi 0.02.

Ohmori wskazuje również, że ciśnienie kontaktu pomiędzy poszczególnymi warstwami izolacji umieszczonej ułożonej poziomo jest wprost proporcjonalne do masy materiałów izolacyjnych. Ponieważ stosowanie przekładek ekranów radiacyjnych powoduje zwiększenie wagi izolacji o blisko 50% autor sugeruje izolowanie powierzchni horyzontalnych za pomocą izolacji składającej się jedynie z pogniecionych ekranów radiacyjnych lub ekranów radiacyjnych o specjalnie wytłoczonej powierzchni.

4.3. Modelowanie matematyczne przenikania ciepła przez wielowarstwową izolację próżniową.

Na podstawie informacji zawartych w rozdziale 4.1 i 4.2 można wskazać, iż na skuteczność wielowarstwowej izolacji próżniowej wpływ mają następujące wielkości:

1. Parametry i cechy dotyczące systemu izolacji:
 - zakres temperatury pracy izolacji,
 - ilość zastosowanych warstw izolacji,
 - stopień kompresji warstw izolacji,
 - ciśnienie oraz rodzaj gazu resztkowego w przestrzeni próżniowej
 - sposób nawinięcia izolacji na powierzchnie izolowaną (nawijanie/nakładanie warstw ekranów radiacyjnych),
 - kształt (układ płaski/cylindryczny) oraz wymiary układu izolacyjnego
 - orientacja układu (poziomy/pionowy)
 - sposób wykonywania pakietów ekranów radiacyjnych
 - stopień perforacji powierzchni ekranów radiacyjnych
2. Parametry materiałowe:
 - emisyjność powierzchni ekranów radiacyjnych
 - emisyjność powierzchni zamykających przestrzeń próżniową
 - współczynnik przewodzenia ciepła i grubość materiału przekładki
 - przewodność cieplna w miejscach kontaktu ekran – przekładka lub ekran - ekran

Przy matematycznym opisie procesu przenikania ciepła przez superizolację w miarę możliwości należałoby uwzględnić wszystkie z wyżej wymienionych czynników. Jednak niektóre z tych parametrów, takie jak stopień perforacji powierzchni ekranów, mają niewielki wpływ na skuteczność izolacji lub nie jest możliwe przedstawienie dostatecznie dokładnego opisu matematycznego takiego parametru (wpływ orientacji układu, sposób wykonywania pakietów izolacyjnych). Przy modelowaniu matematycznym można również pominąć wpływ metody instalacji izolacji, ponieważ pogorszenie właściwości izolacji wynikające z nawijania ekranów radiacyjnych można wyeliminować – patrz rozdział 4.2.

W kriogenicznej praktyce inżynierskiej do szacowania ilości ciepła przenikającego przez wielowarstwowe izolacje próżniowe bardzo często wykorzystywane są półempiryczne wzory zaproponowane przez Cunningtona [32]. Autor, na podstawie szeregu wyników przeprowadzonych badań superizolacji, opracował zależności (patrz - Tabela 4-3) pozwalające wyznaczyć skuteczność superizolacji w zależności od rodzaju materiałów zastosowanych do wykonania izolacji, ilości zastosowanych warstw ekranów radiacyjnych i stopnia ich kompresji oraz od temperatury cieplej i zimnej powierzchni izolacji. Różnice wartości strumieni ciepła przenikające superizolacje uzyskiwane na podstawie obliczeń z wykorzystaniem wzorów Cunningtona w porównaniu z wynikami pomiarów uzyskanych przez autora wynoszą do 20%.

Tabela 4-3. Wzory do szacowania wartości strumienia ciepła przenikającego przez wielowarstwowe izolacje próżniowe dla izolacji wykonanych z różnych materiałów- Cunnington [32].

DGM/DSN	$q = \frac{4.37 \cdot 10^{-11} \cdot \bar{N}^{3.27} \cdot T_m (T_H - T_C)}{N + 1} + \frac{1.444 \cdot 10^{-14}}{N} (T_H^{4.51} - T_C^{4.51})$
DAM/DSN	$q = \frac{7.46 \cdot 10^{-12} \cdot \bar{N}^{3.56} \cdot T_m (T_H - T_C)}{N + 1} + \frac{3.19 \cdot 10^{-12}}{N} (T_H^{4.67} - T_C^{4.67})$
DAM/Tissueglas	$q = \frac{1.13 \cdot 10^{-13} \cdot \bar{N}^{3.91} \cdot T_m (T_H - T_C)}{N + 1} + \frac{4.727 \cdot 10^{-13}}{N} (T_H^{4.67} - T_C^{4.67})$
Pognieciony SAM	Dla $\bar{N} \leq 35$ warstw/cm $q = \frac{1.65 \cdot 10^{-9} \cdot \bar{N}^{2.32} \cdot T_m (T_H - T_C)}{N + 1} + \frac{5.97 \cdot 10^{-13}}{N} (T_H^{4.67} - T_C^{4.67})$ Dla $\bar{N} > 35$ warstw/cm $q = \frac{8.57 \cdot 10^{-9} \cdot \bar{N}^{2.02} \cdot T_m (T_H - T_C)}{N + 1} + \frac{5.97 \cdot 10^{-13}}{N} (T_H^{4.67} - T_C^{4.67})$

DAM (*double aluminized Mylar®*) – podwójnie aluminizowany Mylar®

DGM (*double goldised Mylar®*) – podwójnie pozłacany Mylar®

SAM (*single aluminized Mylar®*) – jednostronnie aluminizowany Mylar®

DSN (*double silki net*) – podwójna siateczka jedwabna

Tissueglas – przekładka w postaci maty ze sprasowanych włókien szklanych

4.3.1. Model matematyczny przenikania ciepła przez wielowarstwową izolację próżniową.

Modelowanie procesu przenikania ciepła przez wielowarstwową izolację próżniową zachodzącego w warunkach ustalonych jest przedmiotem kilku prac. Najpowszechniej spotykany w literaturze sposób modelowania bazuje na założeniu, iż poszczególne ekrany radiacyjne tworzą powierzchnie izotermiczne, a poszczególne mechanizmy biorące udział w przenikaniu ciepła (promieniowanie ciepła, przewodzenie ciepła przez ciało stałe oraz przewodzenie ciepła przez gaz) nie pozostają w wzajemnej interakcji [3, 5, 27, 28, 63, 80, 91, 116]. Dla takich założeń przyjmuje się, iż suma strumieni ciepła poszczególnych mechanizmów wymiany ciepła pomiędzy dwoma powierzchniami o temperaturze T_{i+1} i T_i ($T_{i+1} > T_i$) jest równa całkowitemu strumieniowi ciepła przenikającego przez wielowarstwową izolację próżniową – patrz Rysunek 4.10:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{ri+1-i} + \dot{Q}_{si+1-i} + \dot{Q}_{gi+1-i} \quad (4.16)$$

gdzie $\dot{Q}_{ri+1-i}$ jest strumieniem ciepła wymienianego na drodze promieniowania cieplnego, $\dot{Q}_{si+1-i}$ jest strumieniem ciepła wymienianego na drodze przewodzenia ciepła przez ciało stałe, a $\dot{Q}_{gi+1-i}$ jest strumieniem ciepła przewodzonego przez gaz. W wyrażeniu (4.16) $i = 0, 1, 2, \dots, N+1$ oznacza kolejny numer warstwy z N ilości zastosowanych warstw. Przez wartości $i=0$ rozumie się powierzchnię zimną izolacji, natomiast przez wartość $i=N+1$ – powierzchnię ciepłą. Ponieważ pomiędzy ostatnim (najbardziej zewnętrznym) ekranem radiacyjnym superizolacji a zewnętrzną (ciepłą) powierzchnią izolacji nie dochodzi do wzajemnego kontaktu to:

$$\dot{Q}_{sN+1-N} = 0 \quad (4.17)$$

i równanie (4.16) przyjmuje postać:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{rN+1-N} + \dot{Q}_{gN+1-N} \quad (4.18)$$

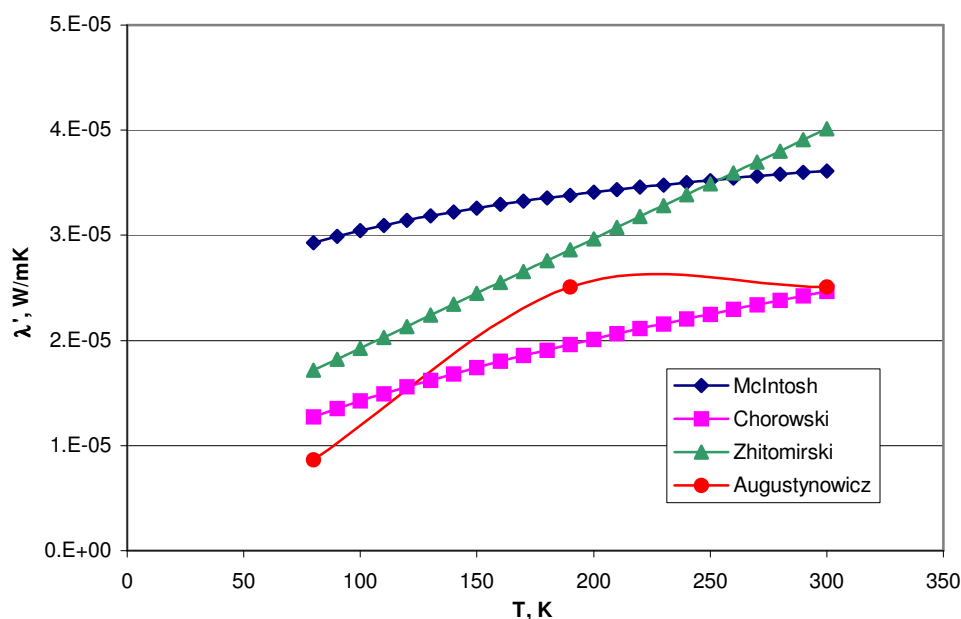
Wyznaczenie całkowitego strumienia ciepła przenikającego przez wielowarstwową izolację wymaga wprowadzenia do wyrażenia (4.16) odpowiednie zależności, zapisanych równaniami (4.7)-(4.14), opisujących poszczególne mechanizmy wymiany ciepła. Aby dopełnić taki zapis matematyczny niezbędna jest znajomości wartości parametrów charakterystycznych dla poszczególnych równań.

Określenie wartości strumienia ciepła przewodzonego przez gaz resztkowy z zależności (4.5) lub (4.6) wymaga znajomości średnicy cząsteczki, wartości wykładnika adiabaty i masy molowej rozpatrywanego gazu oraz wartości współczynnika akomodacji dla takiego gazu. Wartości wymienionych wielkość w zależności od rodzaju i temperatury gazu przedstawiono w Tabelach 2-1 i 2-2.

Wartości współczynnika λ_s , niezbędnego do określanie ilości ciepła przewodzonego przez materiał przekładek na podstawie równania (4.7), podawane są w oparciu o dane doświadczalne i są wyznaczane na podstawie zmierzonego rozkładu temperatur na poszczególnych warstwach badanej superizolacji. W Tabeli 4-4 przedstawiono formuły opisujące zależności temperaturowe współczynników λ_s proponowane przez poszczególnych autorów, a graficzną reprezentację tych formuł przedstawiono na Rysunku 4.11.

Tabela 4-4. Wartości współczynnika przewodzenia ciepła przekładek w funkcji temperatury przyjmowane przez poszczególnych autorów do określania ilości przewodzonego ciepła pomiędzy dwoma sąsiadującymi ekranami superizolacji za pomocą zależności (4.7).

Autor	Współczynnik przewodzenia ciepła przekładki, W/mK	Symbol wzoru
McIntosh [80]	$\lambda(T) = 5.4 \cdot 10^{-4} \cdot (0.017 + 7 \cdot 10^{-6}(800 - T) + 0.0228 \cdot \ln(T))$	S1
Chorowski, Grzegory, Riddone [25]	$\lambda(T) = 4.5 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{T}{10}}$	S2
Zhitomirskij, Kislov, Romanenko [116]	$\lambda(T) = 8.82 \cdot 10^{-6} + 1.0410^{-7} T$	S3
Augustynowicz, Demko, Datskow [3]	$\lambda = 2.51 \cdot 10^{-5}$ dla $T = 300$ K $\lambda = 2.51 \cdot 10^{-5}$ dla $T = 190$ K $\lambda = 8.62 \cdot 10^{-6}$ dla $T = 77.3$ K	S3



Rysunek 4.11. Graficzna reprezentacja formuł zawartych w Tabeli 4-4.

Korzystając z wartości współczynnika przewodzenia ciepła przedstawionych w Tabeli 4-4 przyjmuje się, że przekładka ma idealny kontakt z przylegającymi do niej ekranami radiacyjnymi, a więc, że przewodność cieplna w miejscach kontaktu przekładka – ekran radiacyjny ma nieskończenie dużą wartość. Dodatkowo, grubość przekładki δ określa się w oparciu o stopień kompresji warstw ekranów radiacyjnych:

$$\delta = \frac{10^{-2}}{\bar{N}} \quad (4.19)$$

gdzie $\bar{N}$ [warstw/cm] jest stopniem kompresji ekranów radiacyjnych.

Wyznaczenie radiacyjnego strumienia ciepła przy wykorzystaniu odpowiednio zależności (4.12)–(4.14) wymaga znajomości wartości emisyjności poszczególnych powierzchni wymieniających ciepło. Dla wielowarstwowej izolacji próżniowej pod uwagę należy wziąć zarówno emisyjności powierzchni tworzących przestrzeń próżniową oraz emisyjność ekranów radiacyjnych.

Emisyjność powierzchni jest zależna od rodzaju materiału i stanu powierzchni (czystość, sposób obróbki mechanicznej, stopień utlenienia), ale przede wszystkim od jej temperatury. Wartości emisyjności powierzchni typowych materiałów stosowanych w technice kriogenicznej przedstawiono w Tabeli 2-3. Z punktu widzenia modelowania przenikania ciepła przez superizolacje, najbardziej interesujące dane zawarte w Tabeli 2-3 odnoszą się do materiałów stosowanych na powierzchnie zamykające przestrzeń próżniową (płaszcz próżniowe, wewnętrzne zbiorniki ze skroplonymi gazami) i czynne ekrany radiacyjne, tj.: emisyjność stali nierdzewnej, aluminium oraz miedzi.

Eksperymentalne wyznaczenie wartości emisyjności różnych typów ekranów radiacyjnych stosowanych do wykonywania superizolacji było jednym z celów prac prowadzonych przez Cunningtona i innych [32]. Badaniu poddano podwójnie aluminizowany Mylar® DAM (double aluminized Mylar®), podwójnie pozłacany Mylar® - DGM (double goldised Mylar®) oraz jednostronnie aluminizowany, pognieciony Mylar® - SAM (single aluminized Mylar®) w zakresie temperatur 56 – 311 K a wartości emisyjności wyznaczono

metodą kalorymetryczną. Emisyjności poszczególnych typów ekranów radiacyjnych w danej temperaturze można określić posługując się wzorami opracowanymi przez Cunningtona [32] i zamieszczonymi w Tabeli 4-5.

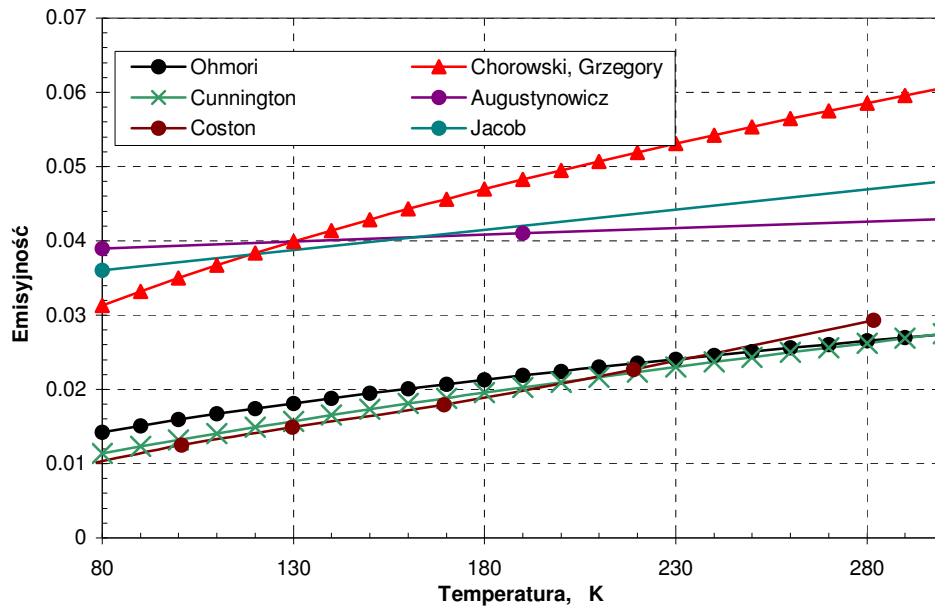
Tabela 4-5. Wyrażenia do określania emisyjności powierzchni różnych typów ekranów radiacyjnych pracujących w danej temperaturze [32].

Materiał	Wartość emisyjności w funkcji temperatury
DAM	$6.13 \cdot 10^{-4} \cdot T^{0.667}$
DGM	$6.49 \cdot 10^{-4} \cdot T^{0.509}$
SAM – strona pokryta Al.	$3,31 \cdot 10^{-4} \cdot T^{0.667}$
SAM – strona nie pokryta Al.	$3,77 \cdot 10^{-3} \cdot T^{0.667}$

W zdecydowanej większości w obecnie wytwarzanych wielowarstwowych izolacji próżniowych materiałem stosowanym jako ekrany radiacyjne jest podwójnie aluminizowany Mylar® (DAM). Z wyrażeń podanych w Tabeli 4-5 wynika, że taki materiał charakteryzuje się emisyjnością o wartości 0.0275, 0.011 oraz 0.0015 w temperaturach odpowiednio: 300 K, 77.3 K i 4.2 K. Również kilku innych autorów przy modelowaniu strumienia ciepła wymienianego przez dwa sąsiadujące ekrany radiacyjne na drodze promieniowania cieplnego przyjmują wartości emisyjności wynikające z takiej zależności. Jednak Keller [68] wskazuje, że badania Cunningtona przeprowadzone zostały dla ekranów pełnych (nieperforowanych), podczas gdy perforacja ekranów radiacyjnych powoduje powstawanie lokalnych nierówności powierzchni, przez co następuje zwiększenie wartości emisyjności. Keller proponuje, aby dla perforowanego DAM przyjmować wartość emisyjności w temperaturze otoczenia jako 0.043. Również Jacob [63], Augustynowicz [3], Coston [31] oraz Chorowski i Grzegory [24] przy modelowaniu przepływu ciepła pomiędzy ekranami przyjmują wyższe wartości emisyjności ekranów radiacyjnych. Różne propozycje wyrażeń służących do wyznaczenia emisyjności DAM w zależności od temperatury ekranu zestawiono w Tabeli 4-6 a ich interpretację graficzną przedstawiono na Rysunku 4.12.

Tabela 4-6. Wyrażenia do określania emisyjności ekranów radiacyjnych wykonanych z podwójnie aluminizowanego Mylaru® (DAM) proponowanych przez różnych badaczy.

Autor	Wartość emisyjności w funkcji temperatury	Symbol wzoru przy modelowaniu matematycznym
Cunnington [32]	$6.13 \cdot 10^{-4} \cdot T^{0.667}$	E1
Chorowski, Grzegory [24]	$3.5 \cdot 10^{-3} \cdot T^{0.5}$	E2
Augustynowicz [3]	$2.86 \cdot 10^{-2} \cdot T^{0.07}$	E3
Ohmori [87]	$1.63 \cdot 10^{-3} \cdot T^{0.495}$	E1
Coston [31]	$3.03 \cdot 10^{-4} \cdot T^{0.81}$	E1
Jacob [63]	$5.5 \cdot 10^{-5} \cdot T + 3.16 \cdot 10^{-2}$	E3

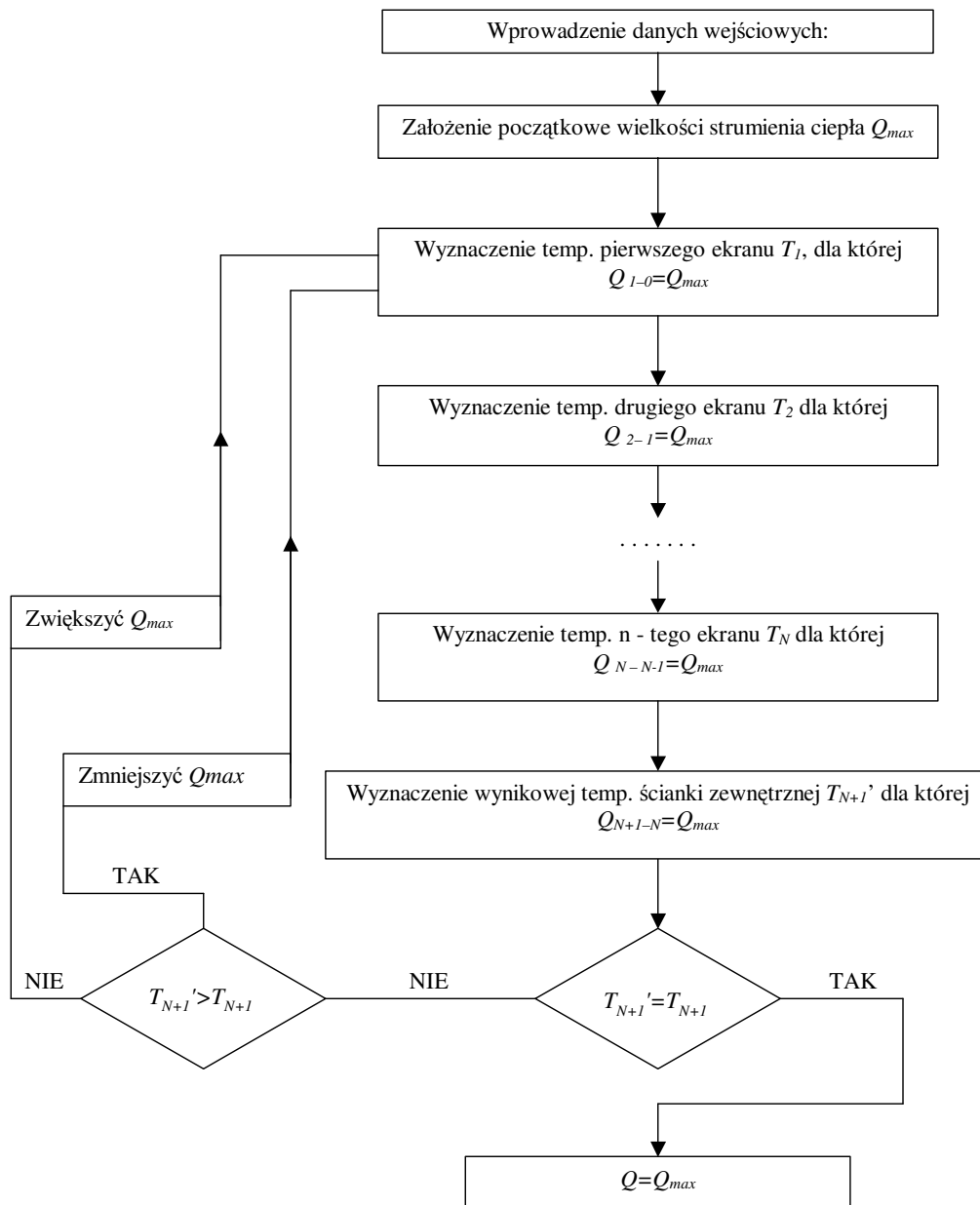


Rysunek 4.12. Wartości emisyjności ekranów radiacyjnych podawanych przez różnych autorów, Ohmori [87], Jacob [63], Augustynowicz [3], Coston [31], Chorowski i Grzegory [24]

Zapisując równanie (4.16) dla N ilości warstw otrzymuje się następujący układ równań:

$$\begin{cases} \dot{Q} = \dot{Q}_{r1-0} + \dot{Q}_{s1-0} + \dot{Q}_{g1-0} \\ \dot{Q} = \dot{Q}_{r2-1} + \dot{Q}_{s2-1} + \dot{Q}_{g2-1} \\ \dots \\ \dot{Q} = \dot{Q}_{rN-N-1} + \dot{Q}_{sN-N-1} + \dot{Q}_{gN-N-1} \\ \dot{Q} = \dot{Q}_{rN+1-N} + \dot{Q}_{gN+1-N} \end{cases} \quad (4.20)$$

w którym występuje $N+1$ równań z $N+2$ niewiadomymi. Rozwiązanie układu równań (4.20) wymaga zastosowania iteracyjnych metod numerycznych. Do tego celu opracowano algorytm obliczeniowy, schematycznie przedstawionym na Rysunku 4.13, który następnie zaimplementowano w programie komputerowy „MLI” napisanym w języku programowania *Delphi Pascal*. Interfejs programu „MLI” przedstawia Rysunek 4.14.



Rysunek 4.13. Algorytm obliczeń iteracyjnych do rozwiązywania układu równań (4.20).

The screenshot shows the MLI software interface. On the left, there are input fields for: Number of radiation shields (20), Layers density (25 Layers/cm), Vacuum chamber pressure (0.00001 Pa), Residual gas (Air), Warm boundary temp. (300 K), Cold boundary temp. (77.3 K), and Distance between boundaries (0.05 m). At the top right are 'Close' and 'Calculate' buttons. In the center is a table with 6 columns: N, qtotal [mW/m2], qq [mW/m2], qr [mW/m2], qs [mW/m2], and Te [K]. The table contains data for the inner boundary and five intermediate layers (1-5). At the bottom, there are three groups of radio buttons for insulation type (Multilayer, Vacuum), system type (Cylindrical, Flat), and MLI placement (beside cold, warm boundary). Below these are three sections for material properties: Radiation shields material (DAM, emissivity 0.0035*T^0.5), Spacer material (User, heat conductivity 8.823*10^-6 + 1.043*10^-7 *Tav), and Boundaries material (Stainless steel, emissivity 0.058*T^0.18). Each section has an 'Edit...' button.

N	qtotal [mW/m2]	qq [mW/m2]	qr [mW/m2]	qs [mW/m2]	Te [K]
Inner boundary					77.300
1	1352.814	0.555	132.077	1220.182	104.003
2	1352.814	0.405	154.636	1197.773	126.962
3	1352.814	0.302	234.871	1117.640	146.336
4	1352.814	0.237	311.998	1040.579	163.015
5	1352.814	0.192	382.597	970.025	177.609
	1352.814	0.160	445.752	906.902	190.554

Rysunek 4.14. Interfejs programu MLI.

Danymi wejściowymi do obliczeń wykonywanych przez program „MLI” są:

- ilość zastosowanych warstw izolacji N
- stopień kompresji warstw $\bar{N}$ uwzględniany jedynie jako liniowa zmiana grubość przekładki
- ciśnienie gazu resztkowego w przestrzeni próżniowej
- rodzaj gazu resztkowego (możliwość wyboru pomiędzy powietrzem, azotem, wodorem i helem)
- temperatura zimnej powierzchni izolacji T_0
- temperatura ciepłej powierzchni izolacji T_{N+1}
- kształt (układ płaski/cylindryczny) i wymiary (odległość między izolowanymi powierzchniami/ średnica zew. i wew. izolacji)
- miejsce ułożenia ekranów radiacyjnych
- charakterystyka temperaturowa współczynnika przewodzenia ciepła materiału przekładki (możliwość wprowadzania przez użytkownika własnych charakterystyk)
- charakterystyka temperaturowa emisyjności ekranów radiacyjnych (możliwość wprowadzania przez użytkownika własnych charakterystyk)
- charakterystyka temperaturowa emisyjności powierzchni zamykających przestrzeń próżniową (możliwość wprowadzania przez użytkownika własnych charakterystyk).

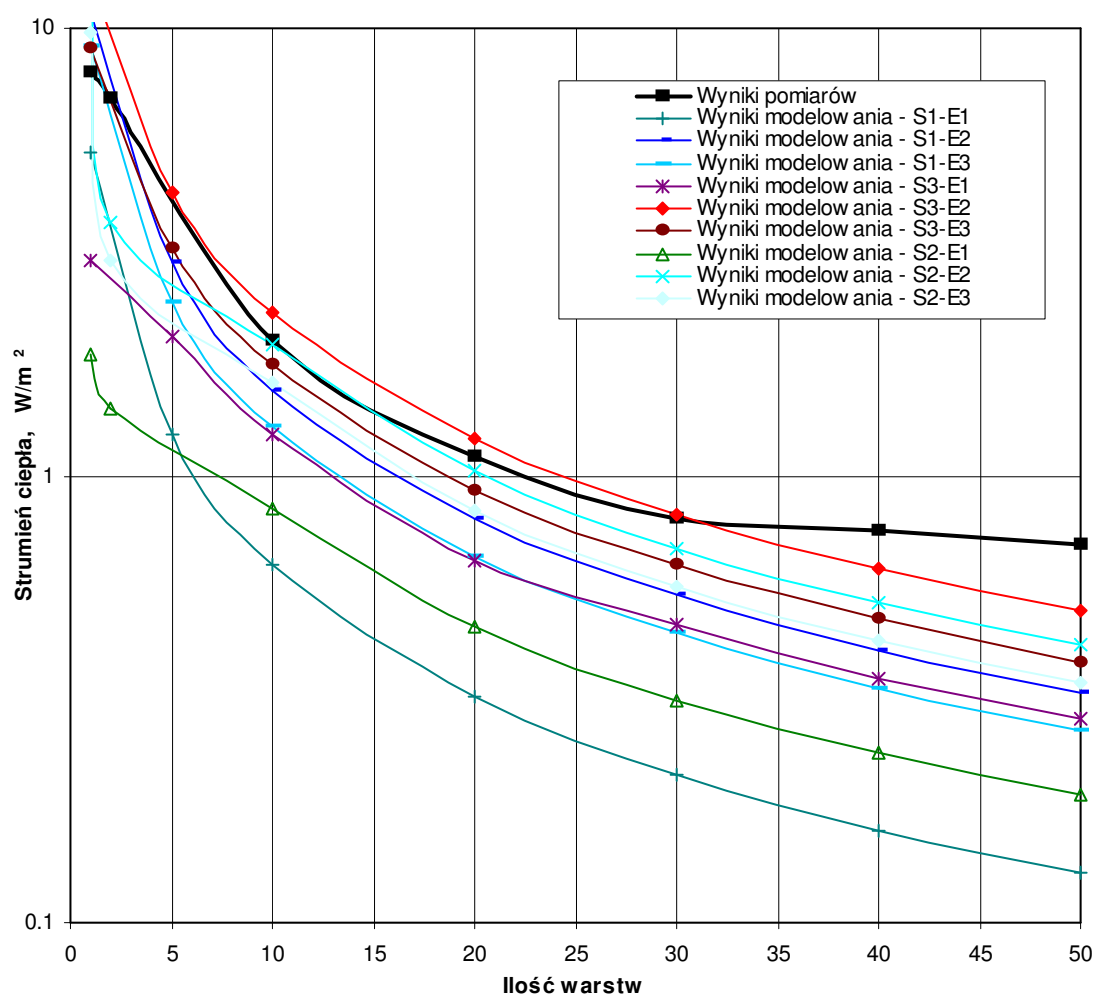
Danymi wyjściowymi programu „MLI” są:

- całkowita ilość ciepła przenikająca przez wielowarstwową izolację próżniową
- ilość ciepła transportowana przez poszczególne mechanizmy wymiany ciepła pomiędzy poszczególnymi powierzchniami izolacji
- temperatury poszczególnych ekranów radiacyjnych

Dodatkowa opcje program „MLI” pozwala na określenie ilości ciepła przenikającą przez izolację próżniową – przypadek dla zerowej ilości ekranów radiacyjnych.

4.3.2. Wyniki modelowania

W pierwszym etapie modelowania matematycznego, przy użyciu opracowanego programu „MLI”, porównano wartości strumieni ciepła przenikającego przez wielowarstwową izolację próżniową otrzymane na drodze modelowania matematycznego z wynikami pomiarów dostępnych w literaturze. Modelowanie matematyczne wykonano dla wartości współczynników przewodzenia ciepła materiału przekładki oraz emisyjności powierzchni ekranów dostępnych w literaturze – Tabela 4-4 i 4-6. Jak pokazują Rysunki 4.11 i 4.12, niektóre z wartości proponowanych przez różnych autorów są zbieżne, dlatego przy modelowaniu użyto wartości wykazujące największe różnice. W Tabeli 4-4 wartości

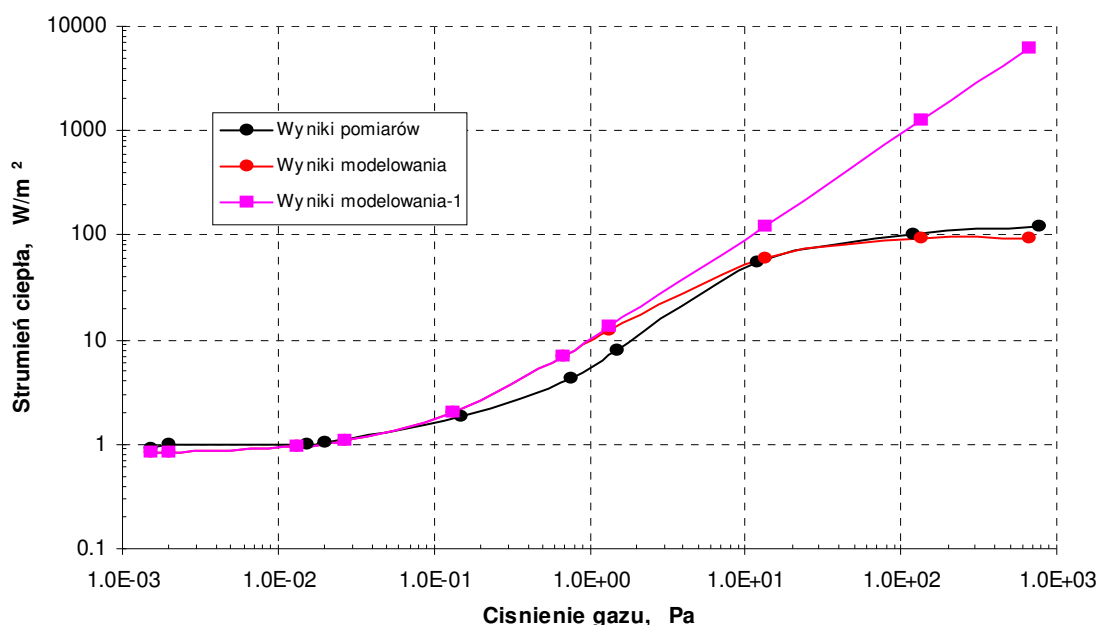


Rysunek 4.15. Porównanie wyników modelowania matematycznego strumienia ciepła przenikającego przez superizolację z dostępnymi danymi pomiarowymi dla zmiennej ilości zastosowanych warstw izolacji pracującej w zakresie temperatur 300 – 77.3 K i dobrych warunkach próżniowych – wyniki pomiarów – Kumur i innych [70].

współczynników przewodzenia ciepła, które wzięto pod uwagę w obecnej analizie oznaczono jako **S1**, **S2**, **S3** natomiast wartości emisyjności powierzchni ekranów radiacyjnych, zestawionych w Tabeli 4-6, jako **E1**, **E2**, i **E3**. Obliczenia przeprowadzono dla izolacji pracującej w zakresie temperatur 300 – 77.3 K w dobrych warunkach próżniowych dla różnej ilości zastosowanych warstw ekranów radiacyjnych. Stopień kompresji warstw izolacji przyjęto jako $\bar{N}=25$ warstw/cm. Do porównania wyników modelowania posłużono się wynikami pomiarów uzyskanymi przez Kumura i innych [70] dla izolacji pracującej w analogicznych warunkach. Wyniki porównania przedstawiono na Rysunku 4.15

Z Rysunku 4.15 wynika, iż najlepszą zgodność z dostępnymi wynikami badań uzyskano przy wykorzystaniu wartości współczynnika przewodzenia ciepła **S3** zaproponowanym przez Zhitomirskiego [116] oraz wartości emisyjności powierzchni ekranów radiacyjnych **E2** zaproponowanej przez Chorowskiego i Grzegorego [24]. Dlatego w dalszej części pracy wszystkie wyniki modelowania uzyskano przy uwzględnieniu tych wartości.

Na Rysunku 4.16 zestawiono literaturowe wyniki pomiarów (Fesmire [42]) i modelowania matematycznego skuteczności superizolacji w zależności od poziomu próżni izolacyjnej. Wyniki modelowania przedstawiono za pomocą dwóch krzywych. Krzywą czerwoną „Wyniki modelowania” otrzymano przez zastosowanie wyrażenia (4.5), opisującego przewodzenia ciepła przez gaz dla wszystkich możliwych warunków (lepkich, przejściowych, molekularnych), w których ten proces może zachodzić. Natomiast krzywą różową „Wyniki modelowania – 1” otrzymano przez zastosowanie wyrażenia (4.3), opisującego przewodzenia ciepła przez gaz jedynie dla warunków molekularnych.

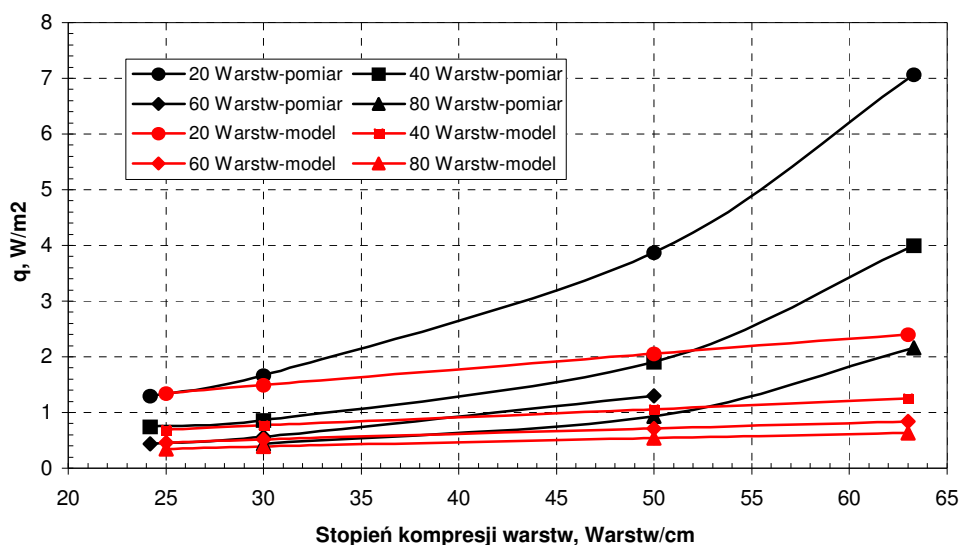


Rysunek 4.16. Porównanie wyników modelowania matematycznego strumienia ciepła przenikającego przez superizolację z dostępnymi danymi pomiarowymi w zależności od poziomu próżni izolacyjnej. Zakres temperatur pracy izolacji: 300 – 77.3 K, 30 warstw ekranów radiacyjnych, wyniki pomiarów: Fesmire [42]. „Wyniki modelowania” i „Wyniki modelowania-1” otrzymano przez zastosowanie wyrażeń opisujących przewodzenie ciepła przez gaz odpowiednio (4.5) i (4.3)

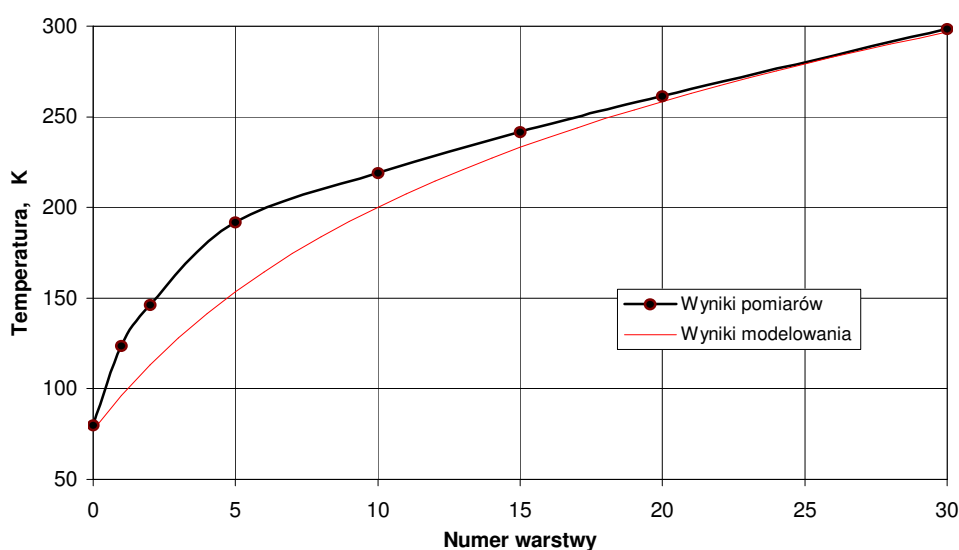
Jak widać, w dla wysokich poziomów próżni stosowanie obydwu zależności przy modelowaniu procesu przewodzenia ciepła przez superizolację daje bardzo dobrą zgodność wyników obliczeń i pomiarów. Natomiast dla warunków mocno zdegradowanej próżni stosowanie wyrażenia (4.3) powoduje duże odstępstwa wyników obliczeniowy od

pomiarowych. Jednak zaproponowane wyrażenie (4.5) pozwala na dość precyzyjne obliczenie skuteczności izolacji nawet dla takich zakresów ciśnień.

Przeprowadzone modelowanie matematyczne skuteczności izolacji w zależności od stopnia kompresji warstw wykazało, że wyniki obliczeń zgodne są z literaturowymi danymi pomiarowymi jedynie dla wartości stopnia kompresji mniejszych od 25 – 30 warstw/cm – patrz Rysunek 4.17. Można zauważyć, iż rozbieżności wzrastają wraz ze stopniem kompresji warstw, niezależnie od ilości zastosowanych warstw izolacji. Otrzymane na drodze modelowania matematycznego wartości temperatury poszczególnych warstw ekranów radiacyjnych również wykazują rozbieżności z dostępnymi w literaturze danymi pomiarowymi. Jest to szczególnie zauważalne dla warstw ułożonych najbliżej powierzchni zimnej izolacji – Rysunek 4.18. Przedstawione fakty oznaczają, że model matematyczny dla izolacji dużej kompresji warstw jest zbyt uproszczony.



Rysunek 4.17. Porównanie wyników modelowania matematycznego strumienia ciepła przenikającego przez superizolację z dostępnymi danymi pomiarowymi dla zmiennego stopnia kompresji warstw izolacji w zakresie temperatur 300 – 77.3 K – dane pomiarowe Bapat [5]



Rysunek 4.18. Porównanie wyników modelowania matematycznego profilu temperatur na wskroś wielowarstwowej izolacji próżniowej z dostępnymi danymi pomiarowymi dla 30 warstw izolacji pracującej w zakresie temperatur 300 – 77.3 K – dane pomiarowe: Fesmire [42]

W technice kriogenicznych izolacji termicznych dąży się, aby stopień kompresji warstw instalowanych izolacji wielowarstwowych był możliwie jak najmniejszy, a w szczególności, aby wartość kompresji warstw izolacji nie przekraczała 30 warstw/cm. Jak pokazano powyżej, dla takiej wartości kompresji warstw izolacji przedstawiony model matematyczny generuje wartości strumienia ciepła bardzo zbliżone do wyników pomiarów opublikowanych w literaturze. Zatem przy użyciu opracowanego modelu matematycznego możliwe jest określanie skuteczności typowej wielowarstwowej izolacji próżniowej w zależności od innych jej parametrów i cech – zakresu temperatur pracy izolacji, ilości zastosowanych warstw oraz ciśnienia gazu resztkowego w przestrzeni próżniowej.

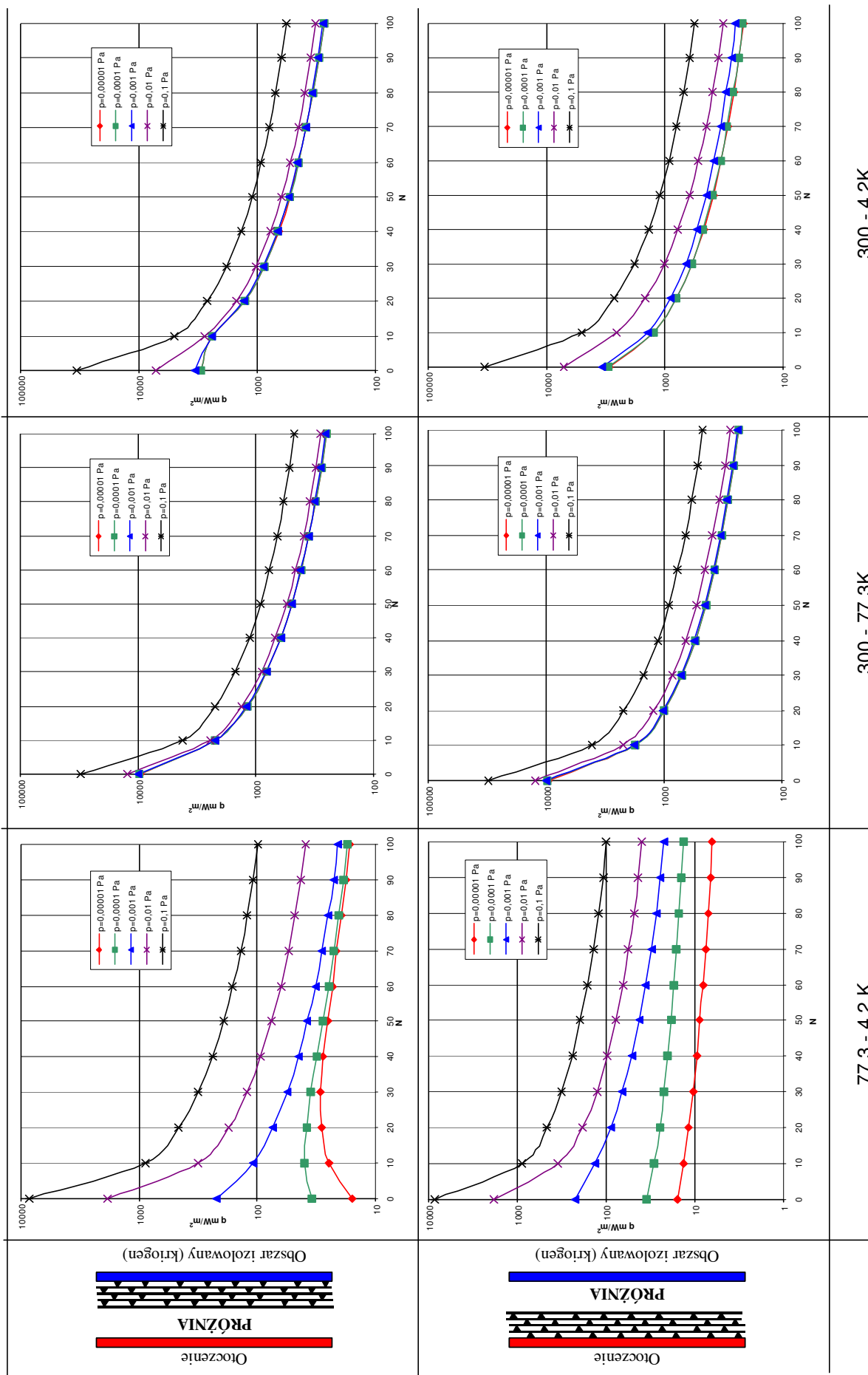
Na rysunku 4.19. przedstawiono wyniki obliczeń strumienia ciepła przenikającego przez wielowarstwową izolację próżniową przeprowadzono dla trzech typowych zakresów temperatur pracy izolacji: 300 – 77.3 K, 300 – 4.2 K i 77.3 – 4.2 K. Dla każdego z wymienionych zakresów analizowano wpływ różnej ilości stosowanych warstw izolacji oraz wpływ ciśnienia gazu resztkowego w przestrzeni izolacyjnej na skuteczność izolacji. W przypadku zakresu temperatur 300 – 4.2 K oraz 77.3 – 4.2 K jako gaz resztkowy przyjęto hel, natomiast dla zakresu 300 – 77.3 K gazem resztkowym jest azot. Odpowiada to sytuacji dość często spotykanej w technice kriogenicznej, kiedy to do przestrzeni próżniowej przedostaje się niewielka ilość gazu przechowywanego w przestrzeni izolowanej. Wartość stopnia kompresji warstw ekranów radiacyjnych izolacji przyjęto jak 20 warstw/cm.

Pomimo iż w przeważającej większości przypadków w technice kriogenicznej ekrany radiacyjne wielowarstwowej izolacji próżniowej umieszcza na powierzchni izolowanej (zimnej), istnieje grupa urządzeń, w których ekrany radiacyjne umieszcza się na powierzchni cieplej. Takie rozwiązania stosowane są w elementach instalacji kriogenicznych o nazwie *cold box*, w których, z pomocą jednej osłony próżniowej, izoluje się szereg połączeń rurociągów ze skroplonym gazem, zaworów lub wymienników ciepła chłodziarek i skraplarek kriogenicznych. Ze względu na skomplikowaną geometrię takich elementów, prawidłowa instalacja izolacji na ich powierzchni często nie jest możliwa. Z tego względu modelowanie matematyczne strumienia ciepła przenikającego przez superizolacje przeprowadzono również dla przypadku instalowania ekranów radiacyjnych przy powierzchni cieplej.

Z Rysunku 4.19 wynika, iż dla zakresów temperatur pracy izolacji 300 – 77.3 K oraz 300 – 4.2 K, niezależnie od miejsca ułożenia warstw ekranów radiacyjnych, zwiększanie ilości zastosowanych warstw powoduje poprawę efektywności izolacji. Szczególnie silną poprawę efektywności obserwuje się przy zwiększaniu ilości warstw przy małej ich liczbie, dla przykładu: zwiększenie ilości warstw z 20 do 30 w zakresie temperatur 300 – 77.3 K i izolacji umieszczonej przy powierzchni cieplej powoduje ograniczenie przepływu ciepła z 1.3 do 0.88 W/m². Natomiast przy stosowaniu więcej niż 40 – 60 warstw dokładanie kolejnych warstw ekranów radiacyjnych poprawia efektywność izolacji jedynie w nieznaczny sposób – przy stosowaniu 60-u warstw dołożenie 10-u kolejnych poprawia efektywność izolacji jedynie z 0.45 do 0.38 W/m². Wyniki modelowania wskazują również, że dla takich zakresów temperatur pracy superizolacja wykazuje się dość dobrymi właściwościami przy dość mocno zdegradowanej próżni izolacyjnej, szczególnie przy stosowaniu ponad 50 warstw ekranów radiacyjnych.

Otrzymane wyniki obliczeń strumienia ciepła przenikającego przez superizolację umieszczoną przy powierzchni zimnej, pracującej w zakresie temperatur 77.3 – 4.2 K i w dobrych warunkach próżniowych wykazują, iż izolacja próżniowa może wykazywać się lepszą efektywnością niż izolacja wielowarstwowa. Dodatkowo, zwiększanie ilości warstw superizolacji dla małej ilości stosowanych warstw powoduje intensyfikację przepływu ciepła przez taką izolację. Rysunek 4.19 pokazuje, że największy strumień ciepła przepływa przez izolację składającą się z ok. 30 warstw. Dalsze zwiększenie ilości warstw ponad tą ilość

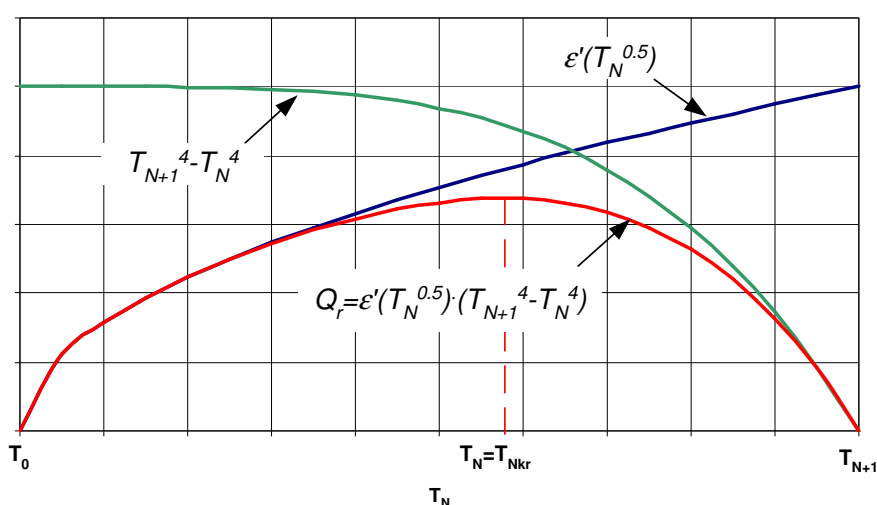
powoduje poprawę efektywności izolacji pracującej w takich zakresach temperatur i ciśnieniu gazu w przestrzeni próżniowej. Należy zwrócić uwagę, iż takie wyniki otrzymane na drodze modelowania mają podobny charakter jak wyniki pomiarów przeprowadzonych przez Lebruna [73] i Bende [13] dla izolacji wielowarstwowej oraz przez Kumara [70] zarówno dla izolacji próżniowej i wielowarstwowej – porównaj Rysunek 4.7.



Rysunek 4.19. Wyniki modelowania zmiany strumienia ciepła przenikającego przez superizolację w zależności od ilości warstw i ciśnienia gazu resztkowego dla ułożenia warstw ekranów radiacyjnych przy powierzchni zimnej lub ciepłej w różnych zakresach temperatur pracy izolacji.

Wzrost strumienia ciepła przenikającego przez wielowarstwową izolacji próżniowej przy zwiększaniu ilości zastosowanych warstw ekranów radiacyjnych wynika z charakteru wymiany ciepła pomiędzy skrajnym ekranem radiacyjnym a ciepłą powierzchnią izolacji. Jeżeli izolacja pracuje w bardzo dobrych warunkach próżniowych można przyjąć, iż ciepło wymieniane jest pomiędzy skrajnym ekranem a powierzchnią ciepłą jedynie na drodze promieniowania cieplnego. Zgodnie z (4.12), dla stałej temperatury powierzchni ciepłej izolacji T_{N+1} , ilość ciepła wymienianego między skrajnym ekranem a tą powierzchnią będzie funkcją jedynie temperatury skrajnego ekranu T_N . Uwzględniając, iż emisyjność ekranu radiacyjnego jest funkcją $T_N^{0.5}$, można zapisać, że całkowita ilość ciepła przenikająca superizolację:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{rN+1-N} = f(T_N) \sim \varepsilon'(T_N^{0.5}) \cdot (T_{N+1}^4 - T_N^4) \quad (4.21)$$



Rysunek 4.20. Zmiana strumienia przepływającego ciepła drogą promieniowania $\dot{Q}_r$, emisyjności zastępczej oraz wartości różnicy $(T_{N+1}^4 - T_N^4)$ w zależności od temperatury skrajnego ekranu radiacyjnego T_N .

Na Rysunku 4.20 przedstawiono zmianę wartości ciepła promieniowania, emisyjności zastępczej oraz różnicy czwartych potęg temperatur powierzchni ciepłej T_{N+1} i skrajnego ekranu radiacyjnego T_N w zależności od zmiany T_N . Temperatura skrajnego ekranu radiacyjnego może przyjmować wartości z przedziału ograniczonego temperaturą zimnej T_0 i ciepłej T_{N+1} powierzchni izolacji. Jak widać, wraz ze wzrostem temperatury skrajnego ekranu emisyjność zastępcza rośnie, natomiast wartość różnicy $T_{N+1}^4 - T_N^4$ maleje. Z tej obserwacji wynika, że przy pewnej krytycznej temperaturze skrajnego ekranu T_{Nkr} promieniowanie cieplne uzyska wartość maksymalną.

Wraz z niewielką degradacją próżni maksimum strumienia ciepła przenikającego przez superizolację przesuwa się w kierunku mniejszej ilości warstw, aby przy ciśnieniu gazu $p=10^{-3}$ Pa całkowicie zaniknąć. Dla takiego i wyższych ciśnień gazu superizolacja umieszczona przy zimnej powierzchni poprawia swoją efektywność wraz ze wzrostem ilości warstw i wykazuje się lepszymi właściwościami niż izolacja próżniowa. Równocześnie można zauważyć, iż przy stosunkowo niewielkiej degradacji próżni – bardzo niski poziom próżni jest niezwykle trudny do utrzymania – skuteczność izolacji próżniowej bardzo mocno ulegają pogorszeniu. Dodatkowo, jak wskazują wyniki pomiarów Lebruna [74], Harrisona

[59] oraz Lehmana i Zahna [75] – Rysunek 4.9 – superizolacja znacznie lepiej niż izolacja próżniowa zachowuje się w sytuacjach awaryjnych, polegających na nagłej utracie próżni izolacyjnej. I właśnie takie właściwości wielowarstwowej izolacji próżniowej uzasadniają jej stosowania w zakresie temperatur 77.3 – 4.2 K, tym bardziej, że przy bardzo wysokim poziomie próżni izolacyjnej superizolacja ma jedynie nieco gorsze właściwości niż izolacja próżniowa.

Niezwykle obiecujące wyniki obliczeń uzyskano dla przypadku stosowania superizolacji w zakresie temperatur 77.3 – 4.2 K dla przypadku ułożeniu ekranów radiacyjnych przy powierzchni ciepłej. Zwiększanie ilości zastosowanych warstw ekranów radiacyjnych, niezależnie od ilości warstw i warunków próżniowych, powoduje poprawę skuteczności superizolacji. Oznacza to, że stosując ekrany radiacyjne w takim zakresie temperatur przy bardzo dobrych warunkach próżniowych możliwe jest uzyskanie lepszego efektu izolacyjnego niż przy wykorzystaniu izolacji próżniowej. Niestety brak jest w literaturze jakichkolwiek informacji dotyczących prowadzenia badań wielowarstwowej izolacji próżniowej dla takiego przypadku.

Porównując ilości przepływającego ciepła przez izolację wielowarstwową w zależności od miejsca ułożenia ekranów radiacyjnych można zauważyć, że dla pewnych ciśnień gazu resztkowego korzystniejsze jest ułożenie ekranów przy powierzchni ciepłej izolacji, a dla innych przy zimnej. Miejsce korzystniejszego ułożenia ekranów w zależności od poziomu ciśnienia i zakresu temperatur obrazuje Tabela 4-7

Tabela 4-7. Porównanie efektywność wielowarstwowej izolacji próżniowej w zależności od miejsca ułożenia ekranów refleksyjnych oraz zakresu temperatur pracy i ciśnienia gazu resztkowego

Przedział temperatur	Ciśnienie, [Pa]				
	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
77.3K - 4.2K	x	x	o	o	o
300K -4.2K	xo	xo	xo	o	o
300K - 77.3K	o	o	o	o	o

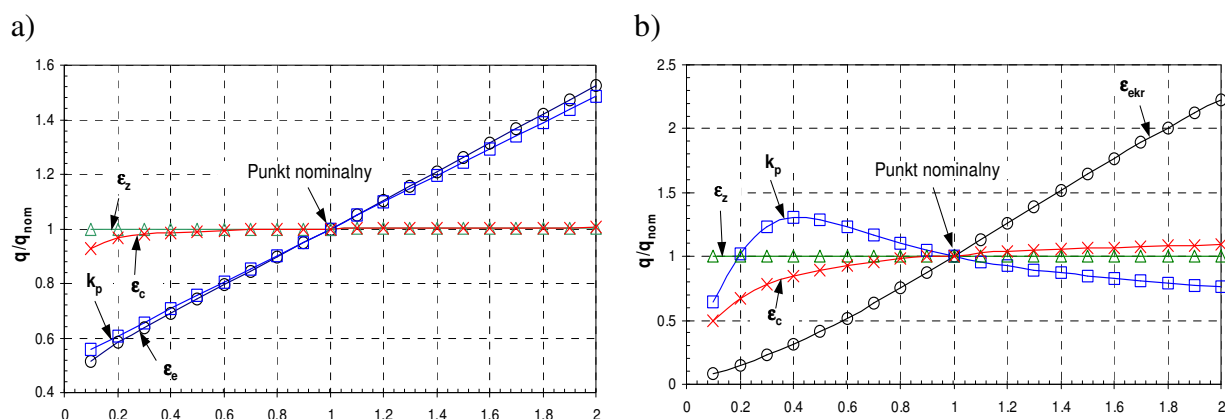
o – ekrany korzystniej umieszczać przy powierzchni zimnej

x – ekrany korzystniej umieszczać przy powierzchni ciepłej

xo – miejsce ułożenia ekranów radiacyjnych nie wpływa znacząco na efektywność izolacji

Z Tabeli 4-7 wynika, że dla temperatur 300 – 77.3 K w całym zakresie stosowanych ciśnień jednoznacznie korzystniejsze jest ułożenie ekranów radiacyjnych przy powierzchni zimnej. Przy zakresie temperatur 77.3 – 4.2 K jedynie powyżej ciśnienia $p=10^{-4}$ Pa umieszczenie ekranów radiacyjnych przy powierzchni zimnej jest korzystniejsze. Natomiast dla zakresu temperatur 300 – 4.2 K, przy ciśnieniu $p \leq 10^{-3}$ Pa, miejsce ułożenie ekranów nie wpływa znacząco na efektywność superizolacji. W przypadku ciśnień wyższych niż 10^{-3} Pa ekrany radiacyjne lepiej umieszczać przy powierzchni ciepłej.

Modelowanie matematyczne pozwala również na określenie wpływu parametrów materiałowych na efektywność stosowanej izolacji. Na Rysunku 4.21 przedstawiono względną zmianę strumienia ciepła przenikającego przez wielowarstwową izolację próżniową w zależności od względnej zmiany poszczególnych parametrów materiałowych. Analizę przeprowadzono dla dwóch przypadków izolacji z ekranami radiacyjnymi przy powierzchni zimnej, pracującej w dobrych warunkach próżniowych: 30-o warstwowa izolacja pracująca w zakresie temperatur 300 – 77.3 K – Rysunek 4.21 a), oraz 10-o warstwowa izolacja pracująca w zakresie temperatur 77.3 – 4.2 K – Rysunek 4.21 b). Jako punkty nominalne przyjęto takie same wartości poszczególnych parametrów materiałowych jak w poprzedniej analizie.



Rysunek 4.21. Zmiana ilości ciepła przewodzonego przez superizolację wraz ze zmianą wybranych parametrów materiałowy izolacji; a) $N=30$ warstw izolacji, przedział temperatur 300 K – 77.3 K; b) $N=10$ warstw izolacji, przedział temperatur 77.3 K – 4.2 K; ϵ_c – emisyjność powierzchni ciepłej, ϵ_e – emisyjność powierzchni zimnej, ϵ_{ekr} – emisyjność powierzchni ekranów radiacyjnych, k_p – przewodność cieplna materiału przekładki

Jak wynika z Rysunku 4.21 a), dla izolacji pracującej w zakresie temperatur 300 – 77.3 K największy wpływ na jej skuteczności ma emisyjność ekranów radiacyjnych oraz wartość współczynnika przewodzenia ciepła przekładki. Ilość ciepła przenikającego przez superizolację jest w tych warunkach w zasadzie proporcjonalna do wartości tych parametrów. Z tego względu w dążeniu do uzyskiwania jak najefektywniejszy właściwości izolacji należy stosować ekrany radiacyjne o możliwie niskiej emisyjności oraz materiały separacyjne o jak najmniejszym współczynniku przewodzenia ciepła. Niewielki wpływ na skuteczność izolacji ma emisyjność powierzchni ciepłej. Dopiero dziesięciokrotne zmniejszenie tegoż parametru uwidacznia się niewielką poprawą efektywności izolacji. Natomiast zupełnie niedostrzegalny jest wpływ emisyjności powierzchni zimnej, nawet dla skrajnych wartości rozpatrywanego przedziału.

Dla przedziału temperatur pracy 77.3 – 4.2 K również wartość emisyjności powierzchni ekranów radiacyjnych oraz współczynnika przewodzenia ciepła przekładki są czynnikami najbardziej wpływającymi na skuteczność izolacji – porównaj Rysunek 4.21 b). Należy zwrócić uwagę, iż emisyjność ekranów radiacyjnych znacznie mocniej determinuje efektywność superizolacji niż w zakresie temperatur 300 – 77.3 K. Zwiększenie wartości emisyjności dwukrotnie powoduje w zakresie temperatur 77.3 – 4.2 K zwiększenie ilości ciepła przenikającego przez izolację o ponad 100%, natomiast w zakresie temperatur 300 – 77.3 K, niespełna o 50%.

Niezwykle ciekawy wpływ na efektywność izolacji pracującej w zakresie 77.3 – 4.2 K ma zmiana wartości współczynnika przewodzenia ciepła. Dla względnych wartości mniejszych niż 0.2 wartości nominalnej materiał o takim współczynniku przewodzenia ciepła poprawia efektywność izolacji. Natomiast w przedziale 0.2 – 1.0 wartości nominalnej, wraz ze wzrostem wartości współczynnika przewodzenia ciepła początkowo obserwuje się wzrost strumienia ciepła ponad wartość nominalną, aby, po osiągnięciu maksimum przy wartości 0.4, następował jego spadek. Dla wartości współczynnika przewodzenia ciepła materiału przekładki większych od nominalnych obserwuje się poprawę efektywności izolacji. Taki charakter zmian również związany jest z temperaturą skrajnego ekranu. Małe wartości współczynnika przewodzenia ciepła powodują, iż temperatura skrajnego ekranu jest większa niż temperatura krytyczna. Zwiększanie wartości współczynnika przewodzenia ciepła powoduje zmniejszanie temperatury skrajnego ekranu w kierunku temperatury krytycznej,

przy której występuje największa intensyfikacji strumienia ciepła przenikającego superizolację. Dla temperatur skrajnego ekranu niższych niż temperatura krytyczna następuje spadek wartości strumienia ciepła.

W takim zakresie temperatur również nie obserwuje się wpływu wartości emisyjności powierzchni zimnej na efektywność izolacji, natomiast znaczne zmniejszenie emisyjności powierzchni cieplej może pozwolić na dość znaczną poprawę skuteczności izolacji.

4.3.3. Różnice pomiędzy wynikami modelowania a wynikami pomiarów.

Jak wynika z Rysunku 4.17, odstępstwa wyników modelowania od wyników pomiarów strumieni ciepła przenikającego przez wielowarstwową izolację próżniową szczególnie mocno uwidaczniają się przy wzroście stopnia kompresji warstw izolacji. Wartości strumieni ciepła uzyskiwane na drodze modelowania matematycznego dla takich przypadków są znacznie niższe niż wynika to z dostępnych danych pomiarowych. Jedną z potencjalnych przyczyn takiego stanu rzeczy można upatrywać w złym sposobie określania ilości ciepła przewodzonej pomiędzy dwoma ekranami radiacyjnymi przez materiał przekładki.

Zgodnie z wyrażeniem (4.8) całkowity opór przepływu ciepła jaki stawia materiał przekładki wynika zarówno z przewodności cieplnej samej przekładki jak i z przewodności cieplnej na powierzchni styku ekran – przekładka. Natomiast przy modelowaniu matematycznym przyjęto pomijalnie mały opór kontaktu pomiędzy ekranami i przekładką a przy zmianie stopnia kompresji warstw intensyfikacja przepływu ciepła przez przekładkę wynikała jedynie z proporcjonalnego zmniejszania jej grubości. Po za tym, wartości współczynników przewodzenia ciepła materiału przekładki podawane w literaturze a uwzględniane podczas obliczeń wyznaczane był na podstawie indywidualnych wyników pomiarów i mogą odnosić się jedynie do przypadków szczególnych. Zatem w celu modyfikacji zaproponowanego modelu matematycznego należy określić rzeczywisty współczynnik przewodzenia ciepła materiału przekładki oraz bliższej analizie poddać charakter zmiany przewodnictwa ciepła na powierzchni styku ekran – przekładka wraz ze wzrostem stopnia kompresji warstw.

W przypadku przekładek wykonanych w postaci siateczek brak jest w literaturze danych eksperymentalnych dotyczących przewodności cieplnej takich materiałów. Natomiast teoretyczne określenie współczynnika przewodzenia ciepła takiej przekładki jest niezwykle trudne ze względu na bardzo skomplikowanego sposobu przenikania ciepła przez materiały, z których przekładki są wykonane. Niemniej jednak pewną próbę teoretycznego wyznaczenia przewodności cieplnej siateczek podjął Bapat w [6], opierając się na założeniu, że przewodność cieplna takich materiałów zależy od przewodności cieplnej nici oraz od przewodności kontaktu w miejscach wzajemnego styku nici. W celu określenia powierzchni kontaktu stykających się Bapat posługuje się formułami Hertza zapisanym dla przypadku poprzecznego przecinania się dwóch walców. Formuły Hertza wskazują, że pole powierzchni kontaktu, obok właściwości mechanicznych stykających się ciał stałych, zleżą od siły docisku w potęgze trzeciej. Jako siłę wzajemnego docisku nici w punkcie styku Bapat postuluje przyjąć siłę wynikającą z ciśnienia, jakie wywiera nawinięty ekran radiacyjny na przekładkę umieszczoną na drugim ekranie radiacyjnym.

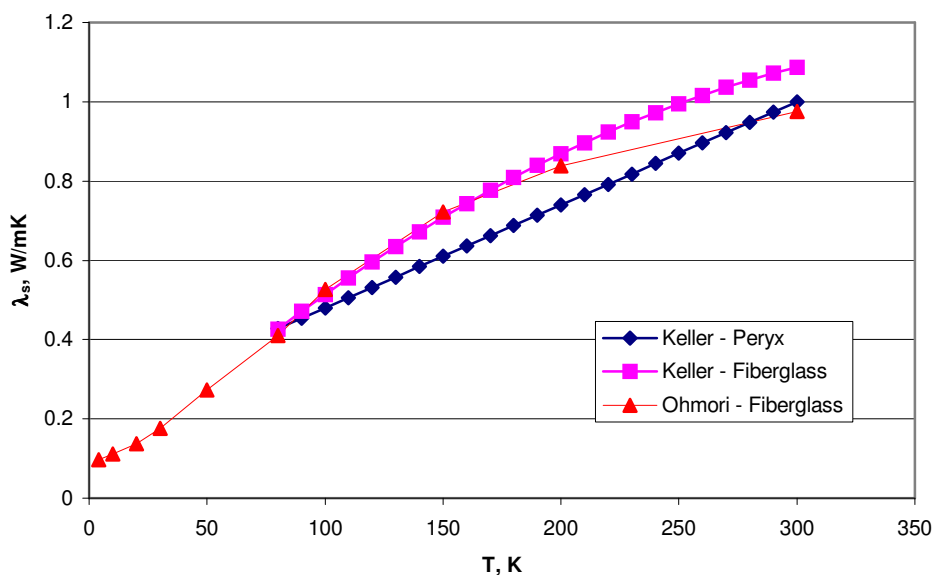
Teoretyczne wyznaczenie przewodności cieplnej siateczki dokonana przez Bapata jest oparta na dwóch ważnych założeniach, których realizacja w warunkach rzeczywistych jest trudna do spełnienia. Pierwsze z nich przyjmuje, iż kontakt siateczki z ekranami na całej rozpatrywanej powierzchni jest jednolity. Należy jednak zauważyć, iż grubość zarówno ekranów radiacyjnych jak i siateczek stosowanych w wielowarstwowej izolacji próżniowej jest rzędu 75 μm , natomiast typowe wartości kompresji warstw nie przekraczają 40 warstw/cm. Tak więc grubość warstwy złożonej z jednego ekranu radiacyjnego i przekładki dla typowej kompresji warstw wynosi 250 μm , co świadczy o tym, że w takich

warunkach przekładki stykają się z ekranami jedynie lokalnie a ciśnienie wywierane przez ekran na przekładkę nie jest równomierne. Dopiero uzyskanie powyżej 65-u warstw/cm, a więc wartości kompresji ekranów w zasadzie nie stosowanej w technice kriogenicznych izolacji próżniowych, mogłoby spowodować, iż przyjęcie założenia jednolitego ciśnienia nacisku ekranu radiacyjnego na przekładkę byłoby zbliżone do warunków rzeczywistych.

Drugim istotnym założeniem jest przyjęcie konstrukcji siateczki jako luźno ułożonych, splatających się nici, a mechanizm przewodzenia ciepła w takiej przekładce uruchamia się dopiero po przyłożeniu pewnego obciążenia zewnętrznego – w tym przypadku ciśnienia docisku ekranu radiacyjnego. Natomiast rzeczywiste siateczki charakteryzuje bardziej skomplikowany splot – patrz Rysunek 4.2 b), a integralność takiej konstrukcji zapewniony jest przez odpowiedni naciąg poszczególnych nici przekładki, którego wartość jest bardzo trudna do określenia.

Ze względu na brak danych dotyczących rzeczywistych wartości przewodności cieplnych przekładek wykonanych w postaci siateczek oraz nie podanie przez Bapata wartości parametrów branych pod uwagę przy modelowaniu przepływu ciepła przez takie materiały nie jest możliwe zweryfikowanie prawidłowości jego analizy.

W przypadku przekładek wykonanych ze sprasowanych włókien szklanych ciepło przewodzone jest poprzez poszczególne włókna przekładki, które pozostają względem siebie we wzajemny kontakcie. O ile przewodność cieplną włókien szklanych można z zadawalającym przybliżeniem określić poprzez znajomość współczynnika przewodzenia ciepła szkła oraz geometrii (długość, powierzchni przekroju poprzecznego) włókna, o tyle równie zadawalające oszacowanie zarówno ilości, jaki i powierzchni kontaktu pomiędzy poszczególnymi włóknami jest w zasadzie niemożliwa. Z wymienionych względów w literaturze można odnaleźć jedynie eksperymentalnie wyznaczone wartości współczynnika przewodzenia ciepła materiałów wykonanych ze sprasowanych włókien szklanych [68, 87] – Rysunek 4.22.



Rysunek 4.22.. Współczynnik przewodzenia ciepła materiałów przekładek wykonanych ze sprasowanych włókien szklanych; Keller i inni [68], Ohmori i inni [87]

Należy zauważyć, że grubość przekładek superizolacji nie przekracza 1 mm, a więc, zgodnie z wartościami przedstawionymi na Rysunku 4.22, przekładki charakteryzują się bardzo dużą przewodnością cieplną rzędu 100 – 1000 W/m²K. Natomiast wartości

teoretyczne przewodności cieplnej przekładki wyznaczone na podstawie wartości pokazanych na Rysunku 4.11 i wyrażenia (4.19) wskazują, iż typowe wartości współczynnika k_s dla superizolacji wynoszą od 0.003 do 0.012 W/m²K. Zatem, na podstawie wyrażenia (4.8), można stwierdzić, iż głównym czynnikiem ograniczającym przewodzenia ciepła pomiędzy sąsiadującymi ekranami radiacyjnymi jest opór cieplny na powierzchniach kontaktu ekran – przekładka. W tym przypadku równanie na przewodzenie ciepła przez przekładkę (4.7) można zapisać w następującej formie:

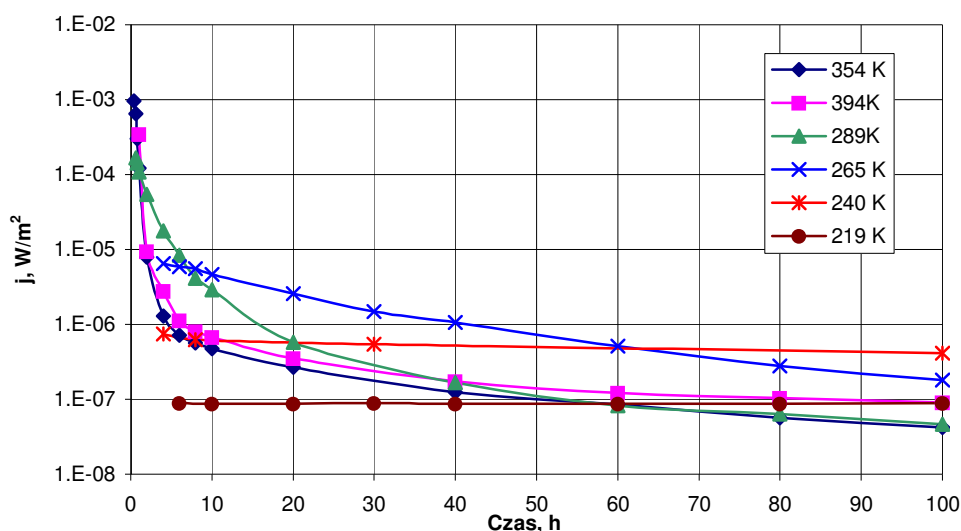
$$\dot{Q}_s = F \cdot h \cdot (T_1 - T_2) \quad (4.22)$$

gdzie h jest przewodnością cieplną w miejscu kontaktu przekładki z przylegającymi ekranami radiacyjnymi, [W/m²K].

Teoretyczne wyznaczenie współczynnika przewodzenia ciepła na powierzchni kontaktu jest również niezwykle trudne. Bapat w [6] do wyznaczenia pola powierzchni wzajemnego kontaktu pomiędzy ekranem a przekładką wykonaną w postaci siateczki ponownie proponuje zastosowanie formuł Hertza, tym razem opisujących przypadek kontaktu powierzchni płaskiej oraz walca o promieniu równym średnicy nici siatki. Natomiast Keller i inni w [68] stwierdzają, iż posługiwanie się formułami Hertza przy takich zagadnieniach jest mocno nieprecyzyjne, ponieważ niemożliwe jest precyzyjne określenie powierzchni wzajemnego kontaktu pomiędzy ekranem a przekładką oraz rozkładu siły dociskającej obydwie powierzchnie. Można jednak na podstawie nich wnioskować, iż wpływ wielkości ciśnienia wzajemnego kontaktu pomiędzy ekranem a przekładką na zmianę kontaktowego współczynnika przewodzenia ciepła powinien mieć charakter potęgowa o wykładniku zbliżonym do wartości 3. Jednak dokładne wyznaczenie wartości przewodności ciepła w miejscu kontaktu ekranu z przekładką możliwe jest jedynie na drodze eksperymentalnej.

Drugą potencjalną przyczyną niezgodności wyników obliczeń i wyników pomiarów dla dużych wartości stopnia kompresji warstw może być przyjęcie założenia, iż ciśnienie gazu w przestrzeniach międzywarstwowych izolacji jest równe ciśnieniu gazu w przestrzeni próżniowej izolacji (po za obrębem warstw ekranów radiacyjnych). Jednak jak wskazują rozważania teoretyczne oraz badania eksperymentalne przeprowadzone przez Lina [77], Bapata [5, 6], Mikhalchenkę [82] oraz Jacoba [65], ciśnienie gazu w przestrzeniach międzywarstwowych wielowarstwowej izolacji próżniowej może być nawet o kilka rzędów wyższe niż ciśnienie w przestrzeni próżniowej. Przyczyną takiego zjawiska jest gazowanie materiałów superizolacji oraz utrudniona ewakuacja gazu z przestrzeni międzywarstwowych powodowana stosunkowo małą przewodnością tych przestrzeni dla przepływu gazu. Zjawisko gazowania materiałów umieszczonych w przestrzeniach próżniowych jest dość dobrze rozpoznane w technice wysokich próżni. Jest ono skutkiem absorbowania i adsorbowania gazów w ciałach stałych przebywających w warunkach otoczenia. Po umieszczeniu takiego ciała w przestrzeni próżniowej, gaz znajdujący się na powierzchni oraz we wnętrzu ciała stałego przepływa do przestrzeni próżniowej. W początkowej fazie gazowanie materiału jest bardzo intensywne, ale po 4 – 10 godzinach trwania procesu [54, 57] intensywność gazowania zmienia swój charakter na bardziej ustabilizowany.

Glassford, Liu i Osiecki [50, 49] dokonali eksperymentalnego określenia gazowania materiałów najpowszechniej stosowanych do wykonywania wielowarstwowych izolacji próżniowych. Otrzymane przez autorów wyniki wartości gazowania podwójnie aluminizowanego Mylaru® (DAM) w zależności od temperatury, w jakiej ten proces zachodzi, przedstawiono na Rysunku 4.23.

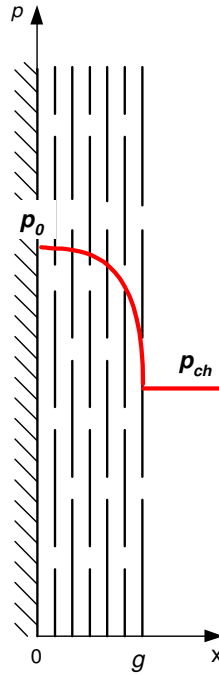


Rysunek 4.23. Wartości gazowania podwójnie aluminizowanego Mylaru® w zależności dla różnych temperatur, w których zachodzi ten proces – Glassford, Liu i Osiecki [50, 49] .

Jak wynika z Rysunku 4.23, jeżeli proces gazowania DAM przeprowadza się w temperaturach otoczenia lub wyższych, to po ok. 20 – 40 godzinach trwania procesu gazowanie ulega stabilizacji i bardzo słabo maleje wraz z czasem trwania tego procesu. Oznacza to, że po pewnym czasie zjawisko gazowania materiałów umieszczonych w próżni zaniknie, ale czas, po którym to nastąpi, będzie bardzo długi.

Należy zauważyć, iż typowy czas pracy izolacji próżniowych stosowanych w kriogenice wynosi kilka lat. Można więc przypuszczać, iż po stosunkowo niedługim czasie pracy wielowarstwowej izolacji próżniowej koncentracje gazu w przestrzeni próżniowej oraz w przestrzeniach międzywarstwowych ulegną wyrównaniu. Zatem przyjęcie przy modelowaniu matematycznym jednolitego ciśnienia gazu w każdym miejscu izolacji odnosi się do modelowania izolacji długo pracującej. Natomiast czas prowadzenia pomiarów skuteczności superizolacji na ogół nie przekracza 100 godzin. W takim przypadku stosunkowo wysokie ciśnienie gazu w przestrzeniach międzywarstwowych może mieć wpływ na uzyskiwane wyniki.

Do określenia rozkładu i poziomu ciśnienia rezydualnego pakiet izolacji ułożony przy powierzchni izolowanej można traktować jak gazujące ciało stałe o grubości g i współczynniku dyfuzji D z wewnętrznym, równomiernie rozłożonym objętościowym źródłem gazu j_v . Ponieważ powierzchnia izolowana nie jest przepuszczalna dla gazu, gaz wydzielany przez materiały izolacji przepływa z przestrzeni międzywarstwowych przez perforacje ekranów radiacyjnych do przestrzeni próżniowej. Schemat rozpatrywanego układu przedstawia Rysunek 4.24.



Rysunek 4.24. Teoretyczny rozkład gazu w pakiecie superizolacji w warunkach izotermicznych.

Rozkład ciśnienia we wnętrzu tak rozpatrywanej izolacji dla warunków izotermicznych opisuje następujące równanie różniczkowe:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{j_v}{D} = 0 \quad (4.23)$$

gdzie j_v jest objętościowym strumieniem gazu [W/m^3 , Pa/s] a D współczynnikiem dyfuzji izolacji dla przepływu gazu [m^2/s].

Przyjmując, iż w przestrzeni próżniowej panuje stałe ciśnienie gazu p_{ch} , można zapisać pierwszy warunek brzegowy:

$$p(g) = p_{ch} \quad (4.24)$$

Ponieważ przy powierzchni izolowanej nie dochodzi do przyływu gazu, można zapisać drugi warunek brzegowy w postaci:

$$\frac{\partial p(0)}{\partial x} = 0 \quad (4.25)$$

Rozwiązanie równania różniczkowego (4.23) dla warunków brzegowych (4.24) i (4.25) ma postać:

$$p(x) = p_{ch} + \frac{j_v}{2D} (g^2 - x^2) \quad (4.26)$$

Grubość izolacji g można wyrazić przez stosunek ilości zastosowanych warstw do stopnia ich kompresji:

$$g = \frac{N}{N}, \quad (4.27)$$

natomiast współrzędną x w równaniu (4.26) przez:

$$x = g \frac{i}{N}, \quad (4.28)$$

gdzie i jest numerem kolejnej warstwy.

Podstawiając (4.27) i (4.28) do (4.26) otrzymuje się wyrażenie, za pomocą którego można wyznaczyć ciśnienie gazu rezydualnego dla i -tej przestrzeni międzywarstwowej:

$$p(i) = p_{ch} + \frac{j_v}{2D} \left(\frac{N}{N} \right)^2 \left(1 - \left(\frac{i}{N} \right)^2 \right) \quad (4.29)$$

Z zależności (4.26) i (4.29) wynika, iż największe ciśnienie gazu będzie panowało w pierwszej przestrzeni międzywarstwowej, a więc pomiędzy powierzchnią izolowaną i pierwszym ekranem radiacyjnym:

$$p_{\max} = p(0) = p_0 = p_{ch} + \frac{j_v}{2D} \left(\frac{N}{N} \right)^2 \quad (4.30)$$

Należy zwrócić uwagę, że przy założeniu stałego stosunku objętościowego strumienia gazu i współczynnika dyfuzyjności dla danej izolacji, to poziom i rozkład ciśnień w pakiecie izolacji zależy jedynie od ilości zastosowanych warstw oraz stopnia ich kompresji. Jest to spostrzeżenie zgodne z wynikami pomiarów ciśnienia gazu rezydualnego w przestrzeniach międzywarstwowych dokonanych przez Bapata [6].

Uwzględnienie wpływu nierównomiernego rozkładu i wysokiego poziomu ciśnień panujących w przestrzeniach międzywarstwowych w danej izolacji wymaga określenie wartości stosunku j_v/D . Zgodnie z zależnością (4.30), wartość tą można zdeterminować realizując pomiar ciśnienia gazu w przestrzeni próżniowej oraz ciśnienia gazu pod izolacją o znane ilości warstw i stopniu ich kompresji.

Zwiększenie stopnia kompresji warstw izolacji powoduje ograniczenie wolnej przestrzeni pomiędzy ekranami radiacyjnymi i przekładką jak również zmniejszenie odległość pomiędzy sąsiadującymi ekranami. Taki stan rzeczy utrudnia ewakuację gazu rezydualnego z przestrzeni międzywarstwowych, a tym samym powoduje zmniejszenie wartości współczynnika dyfuzji izolacji dla gazu. Można zatem domniemywać, że wartość stosunku j_v/D będzie funkcją stopnia upakowania warstw i będzie rosła wraz ze wzrostem kompresji warstw.

Przy normalnej pracy superizolacji, temperatura poszczególnych warstw ekranów radiacyjnych jest różna. W celu określenia rozkładu ciśnienia międzywarstwowego w warunkach nieizotermicznych można posłużyć się następującym wyrażeniem, bezpośrednio wynikającym z równania Clapeyrona:

$$p(i, T_i) = p(i, T) \cdot \frac{T_i}{T} \quad (4.31)$$

gdzie $p(i, T_i)$ jest ciśnieniem gazu rezydualnego w i -tej przestrzeni międzywarstwowej, tworzonej przez dwa ekrany radiacyjne o średniej temperaturze T_i , $p(i, T)$ ciśnienie gazu rezydualnego w i -tej przestrzeni międzywarstwowej, wyznaczone dla warunków izotermicznych a T jest temperaturą, przy której wyznaczano wartość stosunku j_v/D .

5. Badania eksperymentalne

5.1. Cel i zakres badań eksperymentalnych

Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone w Instytucie Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej. Ich celem było:

1. Określenie wpływu ciśnienia gazu w przestrzeni próżniowej, ilości zastosowanych warstw oraz stopień ich kompresji na strumień ciepła przenikający przez wielowarstwową izolację próżniową.
2. Wyznaczenie emisyjności powierzchni ekranów radiacyjnych
3. Wyznaczenie rozkładu ciśnienia gazu rezydualnego w obrębie pakietu ekranów radiacyjnych izolacji.
4. Wyznaczenie oporu przepływu ciepła na powierzchni styku pomiędzy przekładką a ekranem radiacyjnym

Zakres badań:

1. Badanie izolacji przy stałej kompresji warstw i zmiennej ilości warstw
2. Badanie izolacji przy stałej ilości warstw i zmiennym ciśnieniu w przestrzeni próżniowej
3. Badanie izolacji przy stałej ilości warstw i zmiennej kompresji warstw

5.2. Kriostat badawczy

W celu przeprowadzenia planowanych badań wielowarstwowej izolacji próżniowej, w Instytucie Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej skonstruowano i wykonano kalorymetryczny, cylindryczny kriostat badawczy służący do wyznaczania wartości strumieni ciepła przenikających kriogeniczne izolacje termiczne. Konstrukcję kriostatu skonsultowano z pracownikami naukowymi dwóch światowych ośrodków badawczych: Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych CERN w Genewie (Szwajcaria) [11, 94, 109] oraz Inter University Accelerator Center w Delhi (Indie) [33]. Schemat kriostatu przedstawiono na Rysunku 5.1.

Głównymi elementami kriostatu badawczego jest płaszcz próżniowy, wewnątrz którego znajduje się czynny ekran radiacyjny otaczający zbiornik pomiarowy wraz dwoma zbiornikami ochronnymi.

Zbiornik pomiarowy wykonany jest w postaci cylindra ze stali nierdzewnej o grubości ścianki 0.8 mm, średnicy zewnętrznej 130 mm i długości 500 mm. Całkowita powierzchnia boczna zbiornika wynosi 0.204 m^2 , a jego pojemność ok. 6 litrów. Nad górną i dolną powierzchnią zbiornika badawczego umieszczono dwa zbiorniki ochronne o średnicy 160 mm, wysokości 100 mm i objętości 2 litrów każdy, które połączone są ze sobą rurą o średnicy 20 mm. Ponieważ w trakcie prowadzenia badań zbiorniki ochronne i zbiornik pomiarowy wypełnione są tym samym kriogenem, zbiorniki ochronnych blokują dopływ ciepła do powierzchni górnej i dolnej zbiornika badawczego oraz do krawędzi bocznej izolacji umieszczonej na powierzchni bocznej zbiornika badawczego.

Zbiornik badawczy oraz górny zbiornik ochronny podwieszone są pod jednym z kołnierzy kriostatu na dwóch cienkościennych rurach $\varnothing 20 \times 0.25 \text{ mm}$ i długości ponad 1m (po dwie rury na każdy zbiornik). Jadana z pary rur służy do napełniania danego zbiornika skroplonym

kriogenem, natomiast druga ułatwia odprowadzenie dużych ilości par czynnika powstałych podczas procesu napełniania zbiorników. Rury zasilające zbiornik badawczy przechodzą przez wnętrze górnego zbiornika ochronnego. Dzięki temu górny zbiornik ochronny nie dopuszcza, aby ciepło przewodzone przez materiał rury zasilające docierało do zbiornika badawczego. Takie rozwiązania konstrukcyjne powodują, iż ciepło dopływa do zbiornika badawczego jedynie poprzez jego powierzchnię boczną, a więc przez badaną izolację.

W celu ograniczenia strat czynnika znajdującego się w zbiornikach ochronnych, obok zastosowania cienkościennych rur zasilających o znacznej długości, pomiędzy górną powierzchnią kriostatu a górną powierzchnią zbiornika ochronnego umieszczono dodatkowe miedziane ekrany radiacyjne, a pozostałe powierzchnie tych zbiorników pokryto superizolacją.

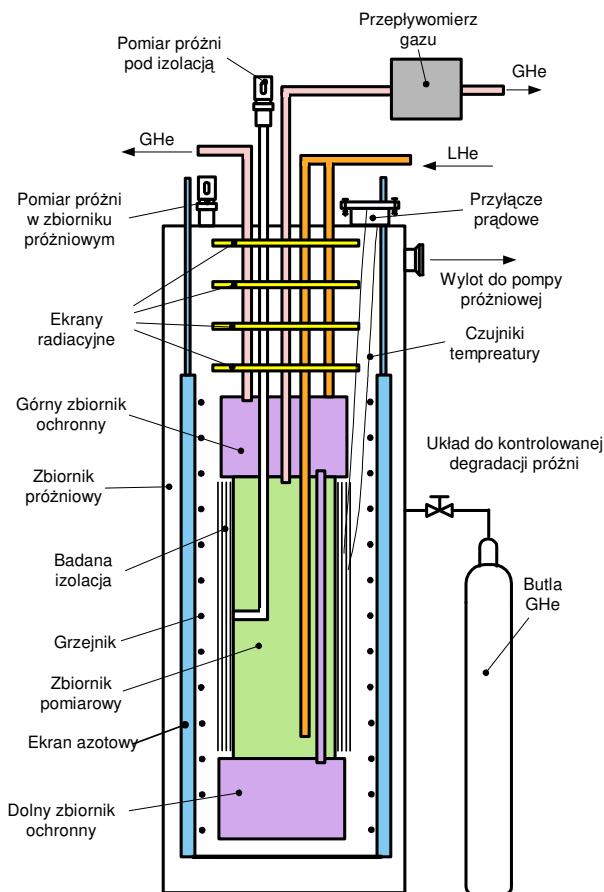
Czynny ekran radiacyjny, otaczający zbiornik pomiarowy i zbiorniki ochronne, wykonany jest ze dwóch współosiowo umieszczonych cylindrów $\varnothing 244 \times 2$ i $\varnothing 284 \times 2$ o długości 785 mm, połączonych ze sobą na krańcach za pomocą dwóch pierścieni. Całkowita pojemności tak powstałego zbiornika wynosi około 17 litrów. Dolną część ekranu zamyka płyta miedziana, której temperatura, w wyniku bardzo dobrego przewodnictwa cieplnego miedzi, jest zbliżona do temperatury pozostałych powierzchni czynnego ekranu radiacyjnego. Ekran radiacyjny zawieszony jest na dwóch rurach, za pomocą których do jego wnętrza można doprowadzić skroplony kriogen.

Płaszcz próżniowy wykonano w postaci cylindra o średnicy 340 mm, grubości 2 mm i długości 1500 mm. Na powierzchni bocznej zbiornika umieszczono port, do którego, za pośrednictwem zaworu próżniowego, podłączona jest pompa próżniowa. Zawór próżniowy umożliwia również podłączenie, w zamian pompy próżniowej, butli ze sprężonym gazem. W takim układzie, przez odpowiednią nastawę zaworu próżniowego, możliwa jest symulacja procesu powolnej degradacji lub nagłej utraty próżni.

Zbiornik próżniowy zamknięty jest o góry dwoma kołnierzami, pod którymi zawieszono czynny ekran radiacyjny oraz zbiornik badawczy wraz ze zbiornikami ochronnymi. Kołnierze wyposażone są porty, do których można przymocować głowice próżniometryczne oraz próżnioszczelne gniazda prądowe umożliwiające doprowadzenie do przestrzeni próżniowej sygnały sterujące lub pomiarowe.

Cechą wyróżniającą opisywany kriostat pomiarowy od innych podobnych konstrukcji przedstawianych w literaturze jest możliwość pomiaru ciśnienia gazu nie tylko w przestrzeni zbiornika próżniowego, ale również pod wewnętrzną powierzchnią badanej próbki izolacji. Jest to szczególnie ważne przy wyznaczaniu rozkładu ciśnienia gazu rezydualnego w przestrzeniach międzywarstwowych superizolacji – patrz rozdział 4.3.3. Pomiar ciśnienia pod badaną izolacją możliwy jest dzięki wykonaniu niewielkiej przestrzeni, ułożonej w połowie długości zbiornika badawczego. Przestrzeń ta połączona jest z umieszczoną na zewnątrz kriostatu głowicą próżniometryczną za pomocą rury o średnicy $\varnothing 10$.

Kriostat umożliwi prowadzenia badań w zakresach temperatur: 300 – 77.3 K (otoczenie – skroplony azot), 300 – 4.2 K (otoczenie – skroplony hel) oraz 77.3 – 4.2 K (skroplony azot – skroplony hel). Jeżeli wymagany zakresu temperatury pracy izolacji wynosi 300 – 77.3 K lub 300 – 4.2 K, czynny ekran radiacyjny jest pusty, a stałą temperaturę 300 K zapewnia układ regulacji temperatury, składający się z regulatora PID współpracującego z czujnikiem temperatury i grzejnikiem elektrycznym umieszczonych na powierzchni wewnętrznej ekranu czynnego. Natomiast, jeżeli zakres badawczy wynosi 77.3 – 4.2 K, czynny ekran radiacyjny wypełnia się skroplonym azotem.



Rysunek 5.1. Schemat budowy kriostatu cylindrycznego do badania skuteczności kriogenicznych izolacji termicznych

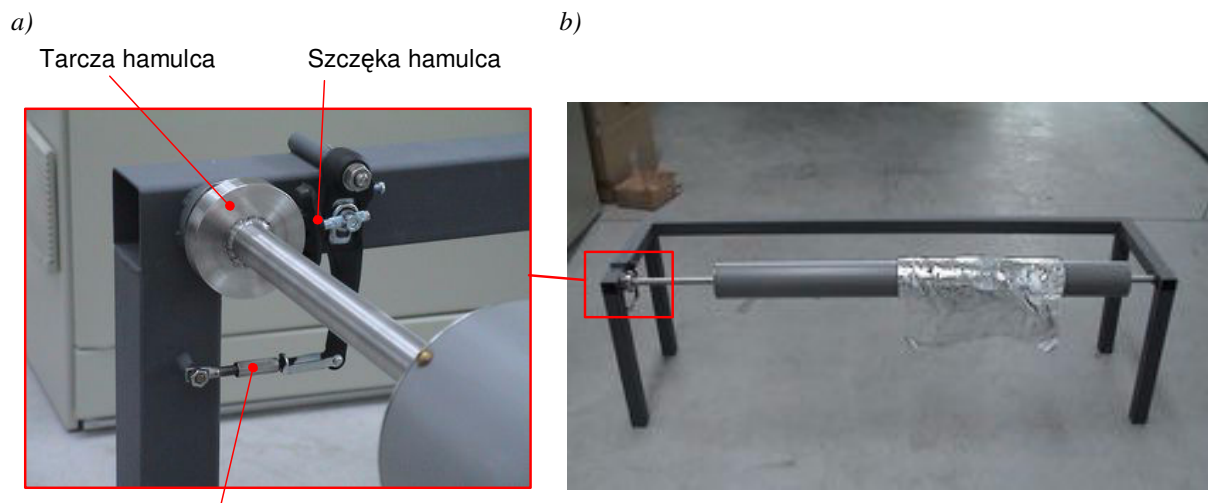
5.3. Procedura i przebieg badań

Na omówionym stanowisku przeprowadzono serię badań strumieni ciepła przenikające wielowarstwową izolację próżniową w zakresie temperatur 300 – 77.3 K. Do badań użyto izolację Jehier IR 305 o następujących parametrach:

- materiał ekranów radiacyjnych – dwustronnie aluminizowanego Mylar® o grubości 6 μm
- grubości warstwy aluminium na ekranach radiacyjnych – 400 $\text{\AA}$ /stronę
- perforacja ekranu radiacyjnego: otwory o średnicy 2 mm, rozłożone co 56 mm (powierzchnia perforacji stanowi ok. 0.1% powierzchni ekranów radiacyjnych)
- przekładki wykonane są w postaci siateczki o grubości 0.15 mm
- oczkach siatki mają kształt rombu o wymiarach boku 1.8 mm i kącie rozwarcia 60°.

W trakcie przeprowadzania wszystkich serii pomiarowych zmianie ulegała ilość zastosowanych ekranów radiacyjnych, stopień ich kompresji oraz ciśnienie gazu resztkowego. Różny stopień kompresji warstw uzyskiwano dwoma metodami. Pierwsza metoda polegała na nawijaniu poszczególnych warstw izolacji ze stałą siłą naciągu. W drugiej metodzie, na powierzchni izolowanej umieszczono wstępnie odpowiednią ilość warstw bez naciągania, a odpowiedni stopień kompresji uzyskiwano przez naciąg jedynie ostatniej, zewnętrznej warstwy izolacji. W celu możliwości zachowania jednolitego naciągu poszczególnych warstw ekranów radiacyjnych skonstruowano specjalny przyrząd pokazany na Rysunku 5.2. Przyrząd składa się z rolki, na której znajduje się instalowana izolacja, podpartej na łożyskach tocznych umieszczonych w ramie przyrządu. Na dolnej podporze rolki umieszczona jest tarcza

hamulca, współpracująca ze szczęką hamulca usytuowanej na ramie. Regulacja siły docisku szczęki hamulca do tarczy realizowana jest po przez zastosowanie gwintowanego trzpienia współpracującego z nakrętką, w której wykonano gwint wewnętrzny. Obrót nakrętki powoduje dociągnięcie lub odciążenie szczęki hamulca do tarczy, dzięki czemu możliwa jest regulacja siły, przy jakiej izolacja odwija się z rolki.

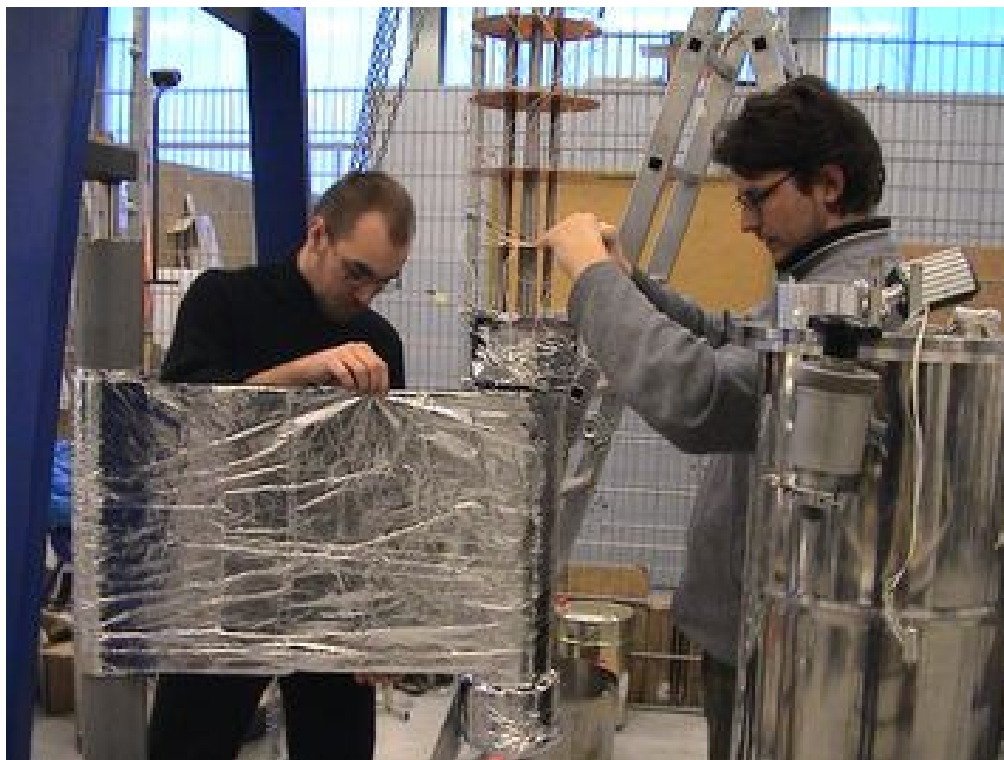


System regulacji siły docisku szczęki hamulca

Rysunek 5.2. Przyrząd do regulacji naciągu nawijania izolacji, a) widok hamulca regulującego siłę naciągu, b) widok ogólny przyrządu – fot. J. Poliński.

Materiał izolacji dostarczony był od producenta w postaci rolki z nawiniętym pasem materiału ekranów radiacyjnych wraz z przekładką. Ponieważ szerokość pasa wynosiła 1 m a wysokość zbiornika badawczego 0.5 m, dlatego, po nawinięciu izolacji na rolkę przyrządu do regulacji siły naciągu, pas materiału rozcinano na pół. Do wyznaczania wartości siły odwijania izolacji użyto wagi sprężynowej, której hak mocujący umieszczano w otworze listewki przytwierdzonej do wolnego końca nawiniętej izolacji. Po ustawieniu żądanej siły odwijania izolacji przyrząd obracano do pozycji pionowej.

Wkładkę badawczą (zbiornik badawczy wraz ze zbiornikami ochronnymi oraz kołnierzem, pod którym są powieszone) wyciągano z kriostatu badawczego i, za pomocą liny przewleczzonej przez specjalne uchwyty, zawieszano na obrotowy hak bramy dźwignicowej. Dzięki możliwości regulacji wysokości zawieszenia, powierzchnię boczną zbiornika badawczego ustawiano na wysokości izolacji nawiniętej na rolkę przyrządu. Następnie wolny koniec izolacji mocowano do powierzchni bocznej zbiornika pomiarowego i, poprzez obracanie wkładki pomiarowej, przewijano izolację z przyrządu na zbiornik. Operację kontynuowano do momentu uzyskania żądanej ilości warstw izolacji, poczym przecinano pas materiału izolacji, i, w celu niedopuszczenia do owijania się izolacji, mocowały powstały wolny koniec do powierzchni zewnętrznej izolacji za pomocą aluminiowej taśmy samoprzylepnej. Tak przygotowaną do badania izolację umieszczano w kriostacie badawczym. Proces nawijania izolacji przedstawiono na Rysunku 5.3.



Rysunek 5.3. Proces nawijania izolacji na powierzchnię zbiornika badawczego – fot. J. Poliński

Wytwarzanie próżni izolacyjnej we wnętrzu zbiornika próżniowego, ze względu na specyfikę pracy pomp próżniowych, dzielono na dwa etapy. W pierwszym etapie, za pomocą wysokowydajnej pompy Rootsa współpracującej z łopatkową pompą próżni wstępnej, obniżano ciśnienie gazu od ciśnienia otoczenia do ciśnienia $0.1 - 1$ Pa. Proces ten trwał około 2 – 3 godzin. Następnie, za pomocą stanowiska do wytwarzania próżni wysokiej, złożonego z pompy turbomolekularnej współpracującej z mechaniczną pompą wstępną, wytwarzano wysoki poziom próżni izolacyjnej. Proces ten trwał na ogół od 20 do 24 godzin, a uzyskiwane poziomy próżni w zbiorniku próżniowym były niższe od 10^{-2} Pa – patrz Rysunek 5.4 .

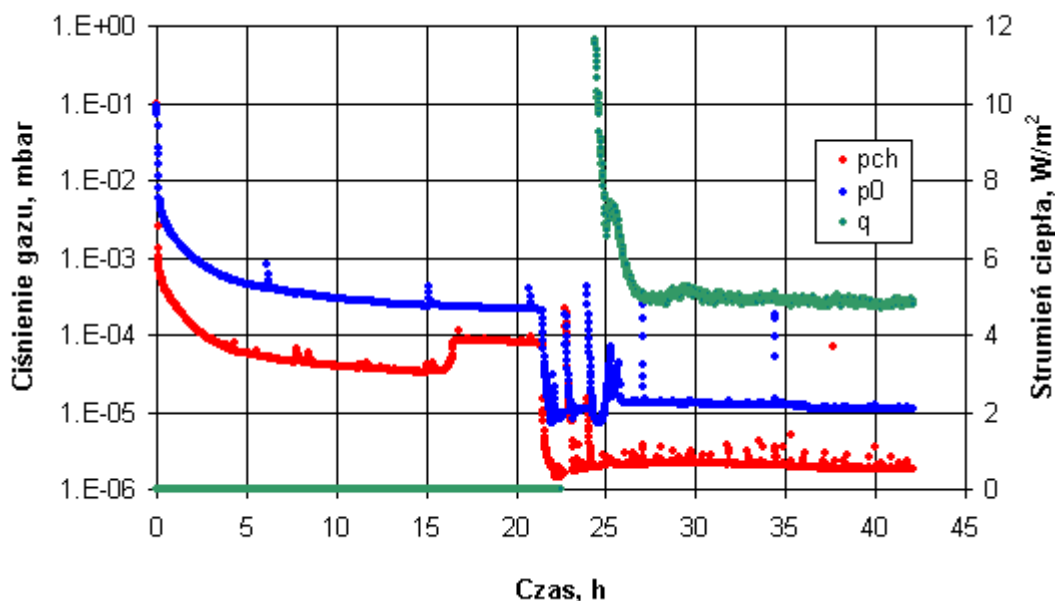
Po tym okresie czasu następowało wypełnianie zbiornika badawczego i zbiorników ochronnych skroplonym azotem. Czynnik podawany był z zewnętrznego zbiornika służącego do przechowywania skroplonych gazów za pomocą specjalnej, przenośnej linii transferu skroplonych gazów. Jeden z końców linii transferowej znajdował się w zbiorniku ze skroplonym azotem a drugi, w napełnianym zbiorniku kriostatu badawczego. Przepływ skroplonego czynnika wymuszany był poprzez wytwarzanie nadciśnienia nad lustrem cieczy w zbiorniku ze skroplonym gazem. Proces napełniania poszczególnych zbiorników kontynuowano do momentu stwierdzenia, iż są one całkowicie wypełnione, co objawiało się wydostawaniem się niewielkich ilości skroplonego czynnika z rur zasilających zbiornik.

Wypełnienie zbiornika badawczego oraz zbiorników ochronnych powodowało znaczne obniżenie ciśnienia gazu zarówno w przestrzeni próżniowej jak i pod badaną izolacją – zjawisko kriopompowania gazu. Ostatecznie otrzymywano próżnię izolacyjną na poziomie niższym od $2 \cdot 10^{-4}$ Pa – patrz Rysunek 5.4 .

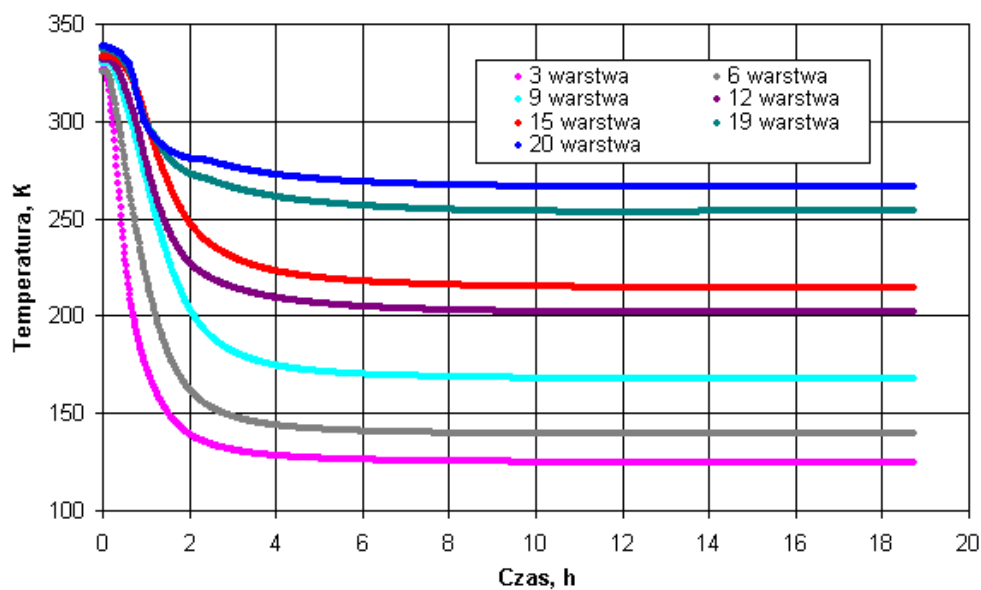
W celu przyspieszenia odgazowania materiału izolacji, podczas procesu wytwarzania próżni podgrzewano powierzchnię czynnego ekranu radiacyjnego do temperatury 340 K, co powodowało podniesienie temperatury izolacji powyżej 320 K. Natomiast od momentu

wypełnienia wewnętrznych zbiorników kriostatu skroplonym azotem do końca serii badawczej, temperaturę ekranu utrzymywano na stałym poziomie 300 K.

Pomiar temperatury wybranych warstw ekranów radiacyjnych na ogół rozpoczynano zaraz przed napełnianiem wewnętrznych zbiorników kriostatu badawczego. Jak widać na Rysunku 5.5, pełna stabilizacja mierzonej temperatury następowała po około 8 – 10 godzinach od momentu napełnienia zbiorników. Podobnego okres czasu wymagała stabilizacja objętościowego strumienia gazu opuszczającego zbiornik pomiarowy, którego wartość odczytywano za pomocą termicznego przepływomierza masowego podłączanego do wylotu ze zbiornika zaraz po napełnieniu zbiornika kriocieczą.



Rysunek 5.4. Przebieg pomiarów – pomiar objętościowego strumienia gazu opuszczającego zbiornik pomiarowy oraz pomiar ciśnienia gazu w przestrzeni próżniowej p_{ch} i pod izolacją p_0 .



Rysunek 5.5. Przebieg pomiarów – zmiana temperatur wybranych warstw superizolacji w czasie.

W trakcie prowadzenia badań mierzono:

- temperaturę wybranych ekranów radiacyjnych superizolacji
- ciśnienie gazu w przestrzeni próżniowej izolacji
- ciśnienie gazu pod badaną izolacją
- strumień objętości odparowanego gazu opuszczający zbiornik pomiarowy
- temperaturę czynnego ekranu radiacyjnego

Pomiaru temperatury wybranych warstw ekranów radiacyjnych dokonywano za pomocą czujników temperatury Pt 100 o dokładności DIN B1/3 ($\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ w 0°C). Czujniki umieszczano w wybranych położeniach podczas procesu nawijania izolacji na zbiornik badawczy. Ze względu na bardzo małe wymiary geometryczne czujników ($2.0\text{ mm} \times 4.0\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$) i niewielkie średnice przewodów prądowych doprowadzonych do czujników ($\varnothing 0.5\text{ mm}$), minimalizowano wpływ obecności czujników na miejscowe zmiany właściwości izolacji, polegające na jej kompresji.

Wyznaczanie temperatury za pomocą czujników Pt100 polega na wyznaczaniu oporności elektrycznej czujnika, a następnie, na podstawie charakterystyki temperaturowo – opornościowej, odczytywaniu zmierzonej temperatury. Najdokładniejszy pomiar oporu czujników uzyskuje się przez zastosowanie metody czteroprzewodowej, polegającej na doprowadzeniu do czujnika stałego prądu o znanej wartości a następnie pomiarze spadku napięcia na czujniku. Metoda ta eliminuje wpływ oporu elektrycznego przewodów prądowych na otrzymane wyniki.

Podczas badań do odczytu wartości temperatury posłużono się 8-o kanałowym miernikiem temperatury firmy Lake Shore model 218S. Monitor ten pozwala na jednoczesny pomiar oporności kilku czujników temperatury metodą czteroprzewodową i, na podstawie zapisanych w pamięci operacyjnej urządzenia charakterystyk temperaturowo – opornościowych, podaje aktualną wartość mierzonej temperatury. Urządzenie, dzięki wbudowanym portom komunikacyjnym RS 232, umożliwia gromadzenie mierzonych danych na dysku twardym komputera.

Pomiaru ciśnienia gazu w zbiorniku próżniowym oraz pod badaną izolacją dokonywano za pomocą dwóch głowic do pomiaru próżni IONIVAC ITR90 firmy Laybold. Głowice tego typu mają wbudowaną w jedną obudowę dwa rodzaje czujników próżniometryczne: Pirani (próżniomierz ciepłoprzewodnościowy) i Bayard-Alpert (próżniomierz jonizacyjny). Dzięki temu głowice charakteryzują się bardzo szerokim zakresem pomiarowym: od 10^5 do 10^{-8} Pa i, szczególnie dla niskich poziomów próżni, stosunkowo dobrą dokładnością odczytu: $\pm 15\%$ wartości odczytywanej.

Do wyznaczania strumienia objętościowego gazu opuszczającego zbiornik badawczy posłużono się trzema urządzeniami pomiarowymi o różnych zakresach pomiarowych. Do pomiaru najniższych strumieni przepływu gazów wykorzystano termiczny przepływomierz masowy firmy M+W Instrument o zakresie pomiarowym 25 – 500 Nml/min. Dla przedstawionej konstrukcji kriostatu badawczego i zastosowaniu skroplonego azotu jak czynnika parującego, zakres pomiarowy przepływomierza daje możliwość pomiarów strumieni ciepła dopływających do zbiornika badawczego w zakresie $0.5 - 10\text{ W/m}^2$. Zaletą pomiarów dokonywanych za pomocą masowych przepływomierzy termicznych jest brak konieczności wyznaczania gęstości przepływającego gazu, co wymaga dodatkowego pomiaru ciśnienia i temperatury gazu. Wynika to ze sposobu pomiaru przepływu, polegającym na pomiarze różnicy temperatury gazu przed i za elementem grzejnym, na którym generuje się stałą moc cieplną.

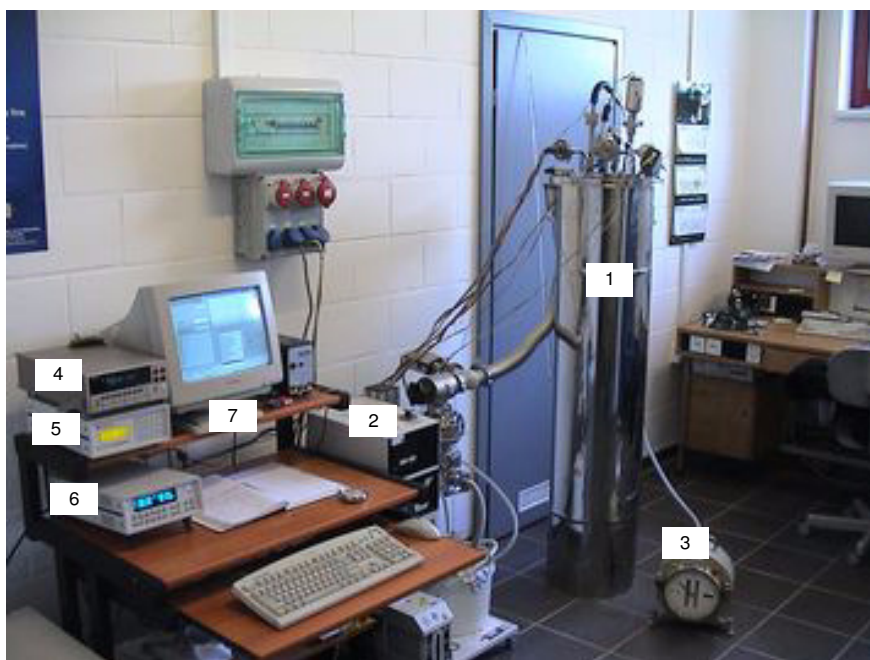
Wyniki pomiarów termicznym przepływomierzem masowym porównywano za pomocą mokrego zegarowego licznika przepływu gazu o zakresie pomiarowym 5 – 75 l/h ($1.66 - 25\text{ W/m}^2$). Licznik gazu wyposażony był w system pomiaru ciśnienia i temperatury

przepływającego gazu. Podczas całego zakresu badań nie stwierdzono znaczących odchyień mierzonego ciśnienia gazu od ciśnienia otoczenia. Wynikało to z faktu, iż prędkość przepływu gazu był nieznaczna, przez co opory przepływu gazu przez urządzenie pomiarowe były pomijalnie małe. Również temperatura przepływającego gazu zbliżona była do temperatury otoczenia dzięki zastosowaniu długiego (2 m) przewodu giętkiego, łączącego licznik z rurą wylotu gazu ze zbiornika pomiarowego.

Przy wysokich zakresach mierzonego strumienia ciepła wykorzystano suchy (wiatrakowy) licznik przepływu gazu o zakresie przepływu 25 – 750 l/h ($8,3 - 250 \text{ W/m}^2$).

Wskazania głowic próżniometrycznych oraz termicznego przepływomierza masowego podawane są przez urządzenia w postaci sygnału napięciowego (0 – 10V dla głowic próżniometrycznych, 0 – 5V dla przepływomierza masowego). Sygnały napięciowy odczytywano wielokanałowym multimetrem elektronicznym firmy Keithley Instruments model 2000. Multimetr wyposażony jest w port komunikacji z komputerem RS 232, dzięki czemu odczytywane dane gromadzono na dysku twardym komputera. Zapis aktualnych wskazań poszczególnych urządzeń pomiarowych dokonywano w odstępach 30 – 60-o sekundowych, uzyskując bardzo szczegółowe charakterystyki czasowe mierzonych wartości.

Stałą temperaturę czynnego ekranu radiacyjnego utrzymywano na żądanym poziomie przy użyciu regulatora temperatury firmy Lake Shore model 331S. Urządzenie pozwala na równoczesny pomiar temperatury w dwóch miejscach, z czego jedno ze wskazań jest sygnałem wejściowym układu regulacji, natomiast drugie wartością porównawczą. Do wyznaczania wartości temperatury również posłużono się czujnikami typu Pt 100, umieszczonymi w dwóch różnych punktach powierzchni wewnętrznej czynnego ekranu radiacyjnego. Podczas wszystkich serii badań różnica wskazań obu czujników nie przekroczyła 0.5 K. Sygnałem wyjściowym regulatora był sygnał prądowy 0 – 1 A, podawany był na grzejnik elektryczny o oporze 50Ω , co dawało zakres 0 – 50 W całkowitej mocy regulowanej. Widok stanowiska badawczego przedstawiono na Rysunku 5.6.



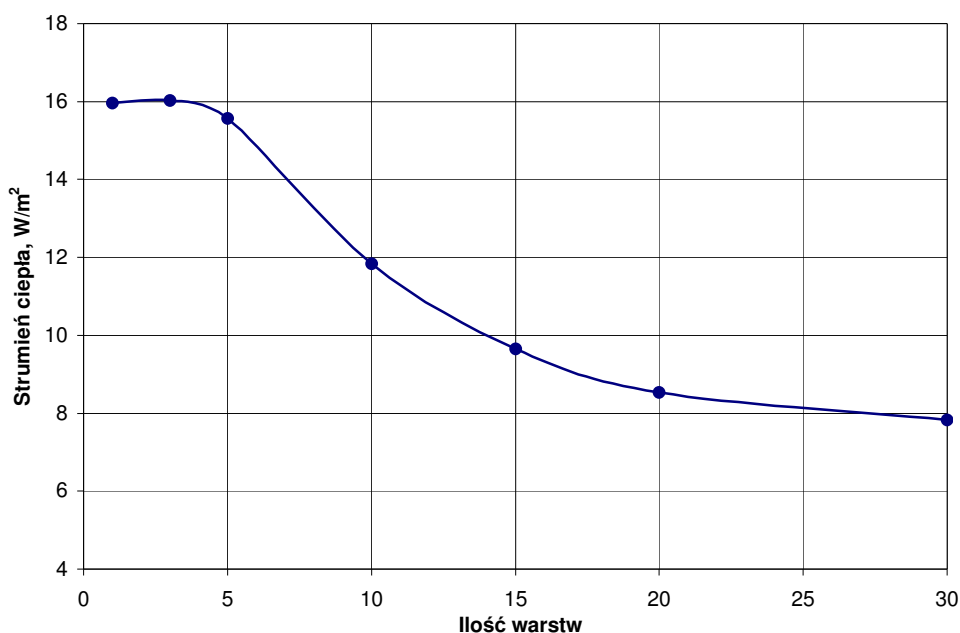
Rysunek 5.6. Widok stanowiska badawczego: 1 – kriosztat badawczy, 2 – turbomolekularna pompa próżniowa, 3 – zegarowy licznik przepływu gazu, 4 – multimetr do odczytu wskazań głowic próżniometrycznych i termicznego przepływomierza masowego, 5 – wielokanałowy monitor temperatury, 6 – regulator temperatury powierzchni czynnego ekranu radiacyjnego, 7 – komputer zapisujący dane pomiarowe – fot. J. Poliński.

5.4. Wyniki pomiarów

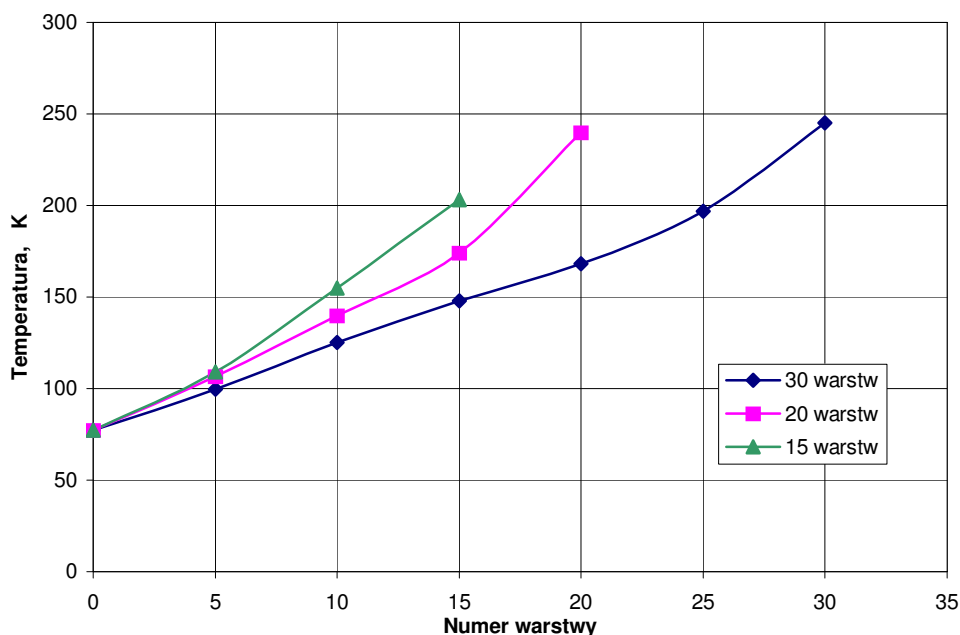
Wyniki pomiaru strumieni ciepła przenikających wielowarstwową izolację próżniową wykazały, iż na otrzymane wartości i charakterystyki duży wpływ ma sposób uzyskiwania kompresji warstw izolacji podczas jej instalacji na powierzchni zbiornika pomiarowego. Przy nawijaniu poszczególnych warstw izolacji ze stałą siłą naciągu każda kolejno nawinięta warstwa izolacji powodowała kompresję warstw już nawiniętych, przez co stopień kompresji warstw na wskroś izolacji nie był jednolity. Dlatego uznano, że dla takiej metody instalacji izolacji prawidłowym jest przedstawienie otrzymanych wyników pomiarów w zależności od siły naciągu ekranów radiacyjnych a nie w funkcji stopnia kompresji warstw. W przypadku drugiej metody, gdzie odpowiedni stopień kompresji uzyskiwano przez naciąg jedynie ostatniej, zewnętrznej warstwy izolacji, stopień kompresji warstw ekranów radiacyjnych na wskroś izolacji był jednolity. Z tego względu wyniki pomiarów otrzymane dla izolacji kompresowanej taką metodą przedstawiono w funkcji stopnia kompresji warstw.

5.4.1. Strumień ciepła przenikający przez wielowarstwową izolację próżniową w zależności od ilości zastosowanych warstw ekranów radiacyjnych

Dla tej serii pomiarowej na powierzchni bocznej zbiornika pomiarowego umieszczono początkowo 30 warstw ekranów radiacyjnych. Zastosowana siła naciągu ekranów miała wartość ok. 4,45 kg i była największą wartością naciągu zastosowaną podczas wszystkich serii badawczych. Podczas procesu instalacji ekranów radiacyjnych na co piątą warstwę izolacji umieszczano czujnik temperatury, przy czym na ostatniej warstwie w różnych lokalizacjach umieszczono trzy takie czujniki. Otrzymywanie późniejszych konfiguracji polegało na odwinięciu odpowiedniej ilości warstw a czujniki temperatury znajdujące się na odwiniętych warstwach umieszczano na powierzchni zewnętrznego ekranu radiacyjnego. Wszystkie wyniki pomiarów dla różnej ilości warstw otrzymano przy ciśnieniu gazu w przestrzeni próżniowej mniejszym niż $2 \cdot 10^{-4}$ Pa. Otrzymane wartości strumieni ciepła przenikających izolację w zależności od ilości zastosowanych warstw ekranów radiacyjnych przedstawiono Rysunek 5.7. Wyznaczenie profilu temperatur na wskroś badanej izolacji wykonano dla 30, 20 i 15 warstw. Dla innych ilości warstw możliwy był pomiar jedynie temperatury warstwy zewnętrznej. Ponieważ na tej warstwie umieszczanych było więcej niż jeden czujnik temperatury, jako wynik pomiaru przyjmowano wartości średnie wskazań poszczególnych czujników. Wyznaczone profile temperatur izolacji przedstawia Rysunek 5.8.



Rysunek 5.7. Skuteczność superizolacji w zależności od ilości zastosowanych warstw – siła naciągu ekranów radiacyjnych 4.45 kg, ciśnienie gazu w przestrzeni próżniowej $p_{ch}=2 \cdot 10^{-4}$ Pa.

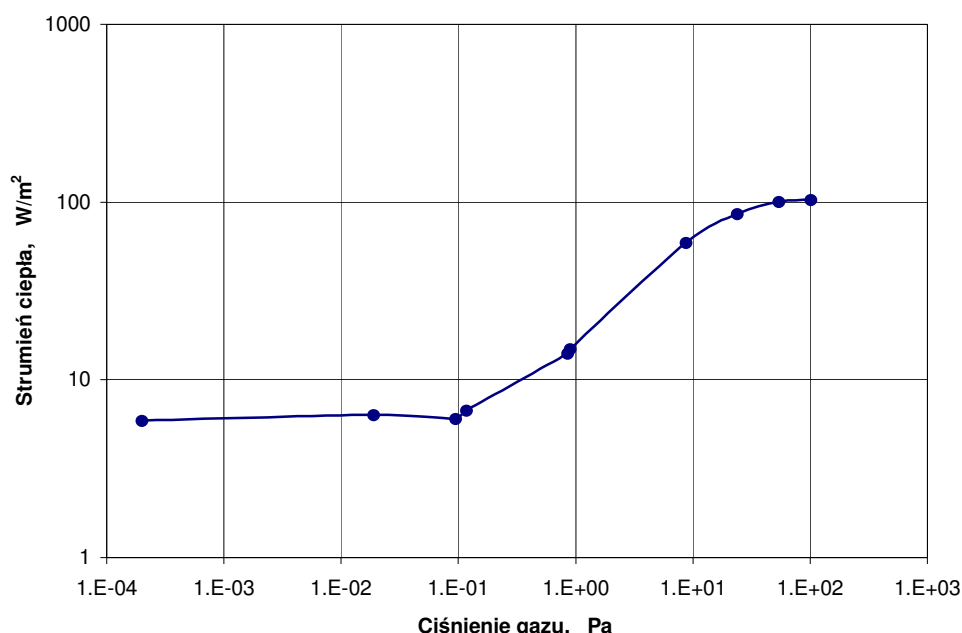


Rysunek 5.8. Zmiana profilu temperatur warstw superizolacji w zależności od ilości zastosowanych warstw – siła naciągu ekranów radiacyjnych 4.45 kg, ciśnienie gazu w przestrzeni próżniowej $p_{ch}=2 \cdot 10^{-4}$ Pa.

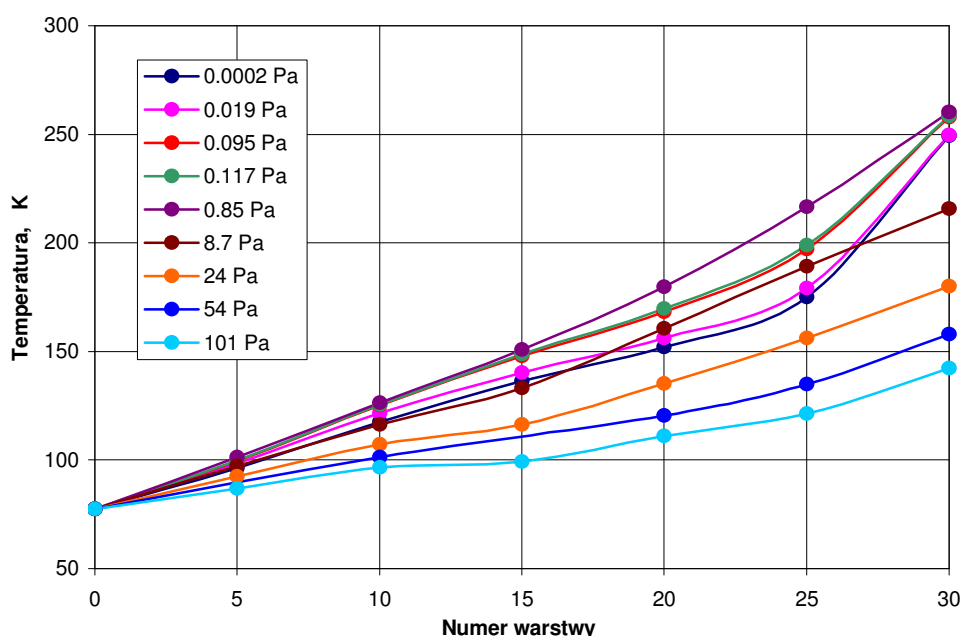
5.4.2. Strumień ciepła przenikający przez wielowarstwową izolację próżniową w zależności ciśnienia gazu w przestrzeni próżniowej

Wpływ ciśnienia gazu wypełniającego przestrzeń próżniową na strumień ciepła przenikający przez superizolację wyznaczono podczas wyżej opisanej serii pomiarowej przy zastosowaniu 30 warstw ekranów radiacyjnych. Odpowiedni poziom ciśnienia uzyskiwano w następujący sposób: po uzyskaniu najniższych ciśnień próżni izolacyjnej do zaworu próżniowego kriostatu podłączano wylot z butli ze sprężonym gazowym azotem. Poprzez chwilowe otwarcie zaworu

próżniowego do przestrzeni próżniowej doprowadzeniu niewielkiej ilości gazu. W ten sposób ciśnienie gazu w zbiorniku próżniowym wzrosło do poziomu 101 Pa. Kolejne niższe poziomy ciśnienia gazu w przestrzeni próżniowej otrzymywano przez usuwanie gazu z tej przestrzeni za pomocą pompy próżniowej. Otrzymane wyniki pomiarów strumienia ciepła oraz profili temperatur dla różnych ciśnień gazu resztkowego przedstawiono odpowiednio na Rysunkach 5.9 i 5.10.



Rysunek 5.9. Skuteczność superizolacji w zależności od ciśnienia gazu w przestrzeni próżniowej– siła naciągu ekranów radiacyjnych 4.45 kg, 30 warstw ekranów radiacyjnych, gaz resztkowy – N₂.

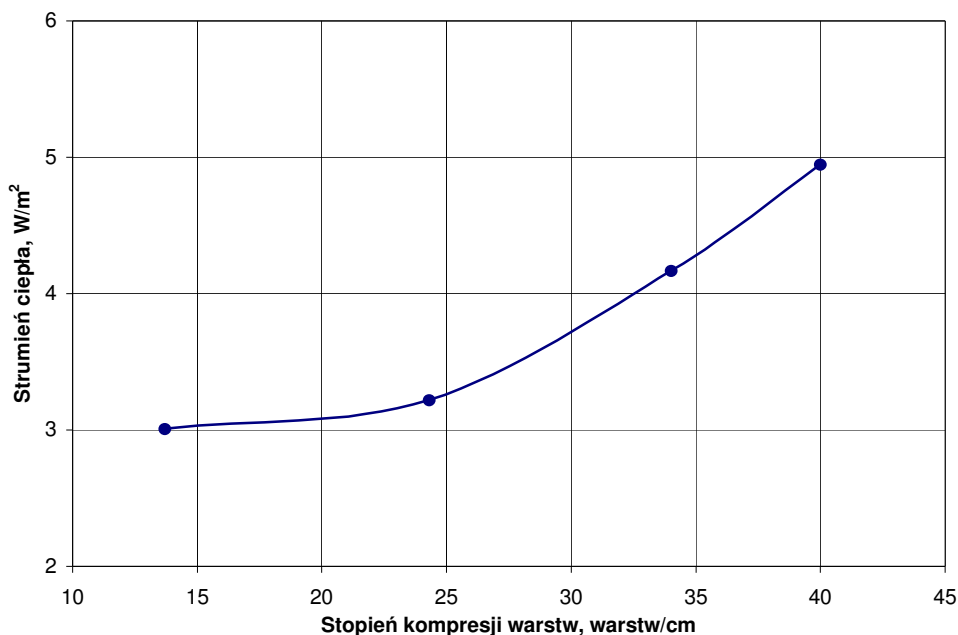


Rysunek 5.10. Zmiana profilu temperatur warstw superizolacji w zależności od ciśnienia gazu w przestrzeni próżniowej – siła naciągu ekranów radiacyjnych 4.45 kg, 30 warstw ekranów radiacyjnych, gaz resztkowy – N₂.

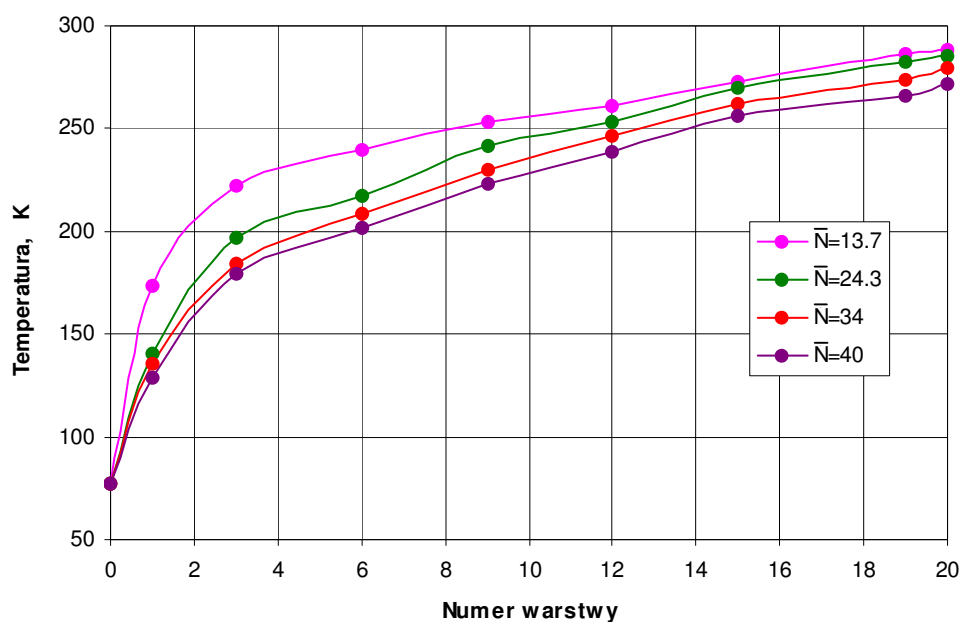
5.4.3. Strumień ciepła przenikający przez wielowarstwową izolację próżniową w zależności od stopnia kompresji warstw izolacji

Podczas tej serii pomiarowej badaniu poddano izolację składającą się z 20 warstw ekranów radiacyjnych. Dla wszystkich pomiarów ciśnienie gazu w przestrzeni próżniowej było mniejsze od $2 \cdot 10^{-4}$ Pa. Początkowo na powierzchni zbiornika pomiarowego nawinięto wymaganą ilość warstw bez ich naciągania. Tak uzyskany pakiet ekranów radiacyjnych rozcięto wzdłużenie i zdjęto z powierzchni zbiornika, otrzymując 20 osobnych arkuszy ekranów radiacyjnych wraz z przekładkami. Następnie na powierzchnię zbiornika pomiarowego nakładano kolejne arkusze ekranów i przekładek, łącząc ich końce za pomocą niewielkich fragmentów aluminiowej taśmy samoprzylepnej. Przy nakładaniu kolejnych warstw szczególną uwagę zwrócono na to, aby krawędź rozcięcia danego arkusza nie pokrywała się z krawędziami rozcięcia warstw już nałożonych. Kompresję warstw uzyskiwano poprzez naciąg ostatniej warstwy ekranów radiacyjnych. Siła naciągu ostatniej warstwy wynosiła 0, 1, 2, i 3 kg, co pozwoliło uzyskać stopnie kompresji warstw o wartościach odpowiednio: 13.7, 24.3, 34 i 40 warstw/cm. Przy kolejnych zmianach kompresji zdejmowano jedynie ostatni ekran poprzedniego ustawienia i zastępowano go nowym, odpowiednio naciągniętym. Stopień kompresji określano na podstawie pomiaru średnicy zewnętrznej skrajnego ekranu radiacyjnego. Czujniki temperatury umieszczono na ekranie 1, 3, 6, 9, 12, 15, 19 i 20.

Wyniki pomiaru strumienia ciepła przenikającego przez badaną izolację w zależności od stopnia kompresji warstw oraz zmierzone temperatury poszczególnych warstw dla różnych stopni kompresji izolacji przedstawiono odpowiednio na Rysunkach 5.11 oraz 5.12.



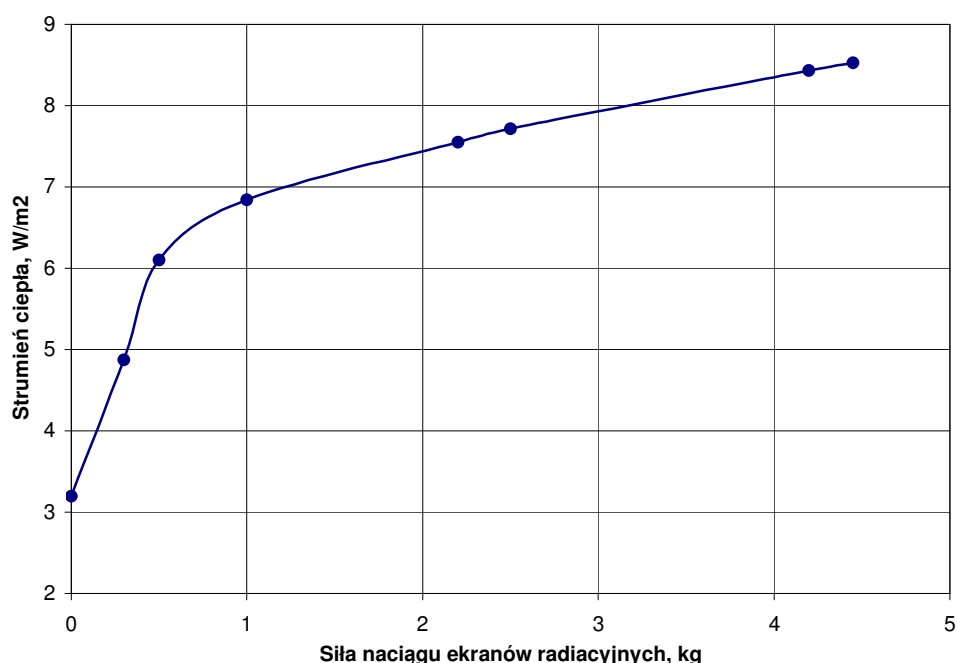
Rysunek 5.11. Skuteczność superizolacji w zależności od stopnia kompresji warstw izolacji – 20 warstw ekranów radiacyjnych, ciśnienie gazu w przestrzeni próżniowej $p_{ch}=2 \cdot 10^{-4}$ Pa.



Rysunek 5.12. Zmiana profilu temperatur warstw superizolacji w zależności od stopnia kompresji warstw izolacji – 20 warstw ekranów radiacyjnych, ciśnienie gazu w przestrzeni próżniowej $p_{ch}=2\cdot 10^{-4}\text{Pa}$.

5.4.4. Strumień ciepła przenikający przez wielowarstwową izolację próżniową w zależności od siły naciągu nawijanych warstw izolacji.

Na Rysunku 5.13 przedstawiono wyznaczone wartości strumienia ciepła przenikającego superizolację w zależności od siły naciągu warstw podczas ich instalacji na powierzchni zbiornika pomiarowego.

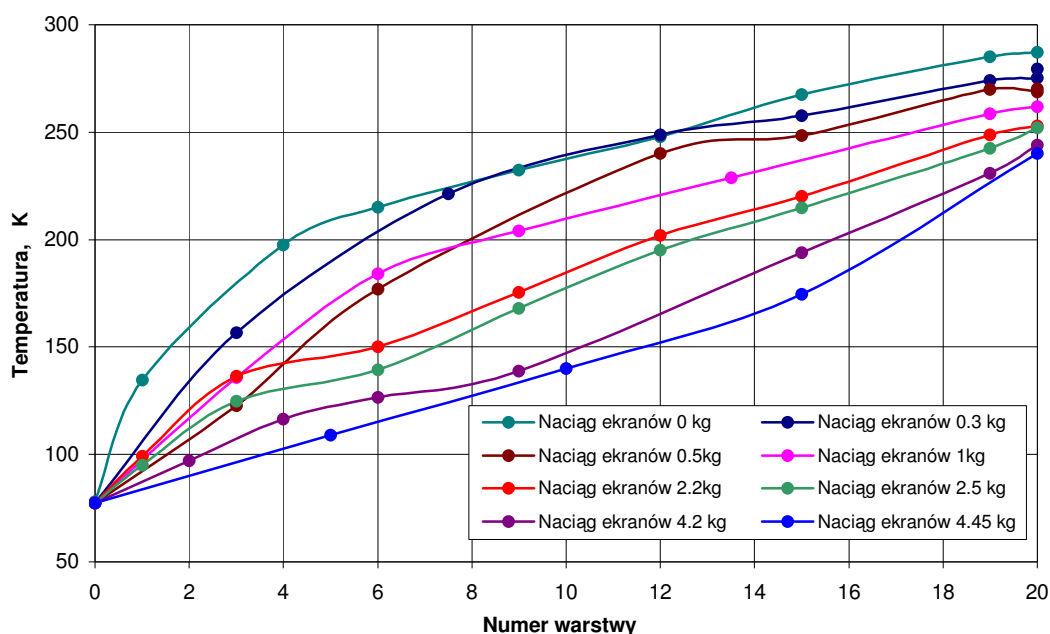


Rysunek 5.13. Zmiana skuteczności superizolacji w zależności od siły naciągu nawijanych warstw izolacji – 20 warstw ekranów radiacyjnych, ciśnienie gazu w przestrzeni próżniowej $p_{ch}=2\cdot 10^{-4}\text{Pa}$.

Kolejne zmiany tego parametru wymagały każdorazowego usunięcia poprzednio mierzonej izolacji. Z tego względu czujniki temperatury można było umieszczać za każdym razem w

innej lokalizacji (na innych warstwach). Pozwoliło to określić wpływ lokalizacji czujników na kształt otrzymywanych profili temperatury izolacji. Wyniki pomiarów temperatury dla różnych konfiguracji izolacji przedstawiono na Rysunku 5.14.

Podczas tej serii badań nie dokonywano wzdłużnego rozcięcia ekranów radiacyjnych – badania przeprowadzono dla izolacji nawiniętej na powierzchnię boczną zbiornika pomiarowego w postaci spirali. Porównanie wyników badań dla braku naciągu warstw ekranów radiacyjnych dla obecnie opisywanej i poprzedniej serii pomiarowej pozwoliło określić wpływ sposobu nakładania warstw ekranów radiacyjnych (nawijanie/nakładanie – patrz rozdział 4.2) na skuteczności otrzymanej izolacji.



Rysunek 5.14. Zmiana profilu temperatur warstw superizolacji w zależności od siły naciągu nawijanych warstw izolacji – 20 warstw ekranów radiacyjnych, ciśnienie gazu w przestrzeni próżniowej $p_{ch}=2\cdot10^{-4}\text{Pa}$.

5.5. Analiza wyników pomiarów.

Na podstawie wyników przeprowadzonych pomiarów możliwe jest określenie intensywności poszczególnych mechanizmów wymiany ciepła uczestniczących w transporcie ciepła przez wielowarstwową izolację próżniową. Zmierzone wartości temperatury ostatniego ekranu radiacyjnego oraz strumień ciepła przenikającego daną konfigurację izolacji pozwala na wyznaczenie emisyjności powierzchni ekranów radiacyjnych w zależności od ich temperatury. Dzięki temu możliwe jest określenie strumienia ciepła wymienianego pomiędzy poszczególnymi ekranami na drodze promieniowania cieplnego. Pomiar ciśnienia w przestrzeni próżniowej izolacji oraz pod jej wewnętrznym ekranem radiacyjnym w warunkach izotermicznych umożliwia wyznaczenie rozkładu gazu rezydualnego w przestrzeniach międzywarstwowych izolacji. Dodatkowo, wyznaczone eksperymentalnie profile rozkładu temperatur na wskroś badanej izolacji pozwalają na wyznaczenie profilu ciśnienia gazu rezydualnego również dla warunków nie izotermicznych, a co za tym idzie, określenie wartości strumienia ciepła wymienianego pomiędzy poszczególnymi ekranami na drodze przewodnictwa cieplnego gazu. Przy znanych wartościach całkowitego strumienia ciepła oraz ilości ciepła wymienianego między sąsiadującymi ekranami radiacyjnymi przez promieniowanie i gaz rezydualny można określić ilość ciepła przewodzonego przez

przekładki a więc przewodność cieplną w miejscach styku pomiędzy przekładkami a przylegającymi ekranami radiacyjnymi.

5.5.1. Wyznaczenie wartości emisyjności powierzchni ekranów radiacyjnych

W wielowarstwowej izolacji próżniowej pracującej przy bardzo wysokim poziomie próżni całkowita ilość ciepła przenikającego izolację jest równa ilości ciepła wymienianego pomiędzy ciepłą powierzchnią izolacji i powierzchnią skrajnego ekranu radiacyjnego na drodze promieniowania. Po odpowiednim przekształceniu wyrażenia (4.14):

$$\varepsilon_{ek} = \left[\frac{\sigma(T_1^4 - T_{ek}^4)}{\dot{q}} - \frac{d_{ek}}{d_1} \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (5.1)$$

możliwe jest wyznaczenie wartości emisyjności powierzchni ekranów radiacyjnych w zależności od ich temperatury. Wykorzystywanie wyrażenia (5.1) wymaga znajomości następujących wartości: powierzchniowego strumienia ciepła przenikającego izolację $\dot{q}$, temperatury T_1 , średnicy d_1 i emisyjności ε_1 ciepłej powierzchni izolacji oraz temperatury T_{ek} i średnicy zewnętrznej d_{kr} skrajnego ekranu radiacyjnego. Przy obliczeniach jako stałe wartości można przyjąć średnicę $d_1=0.24$ m oraz emisyjności $\varepsilon_1=0.161$ ciepłej powierzchni izolacji.

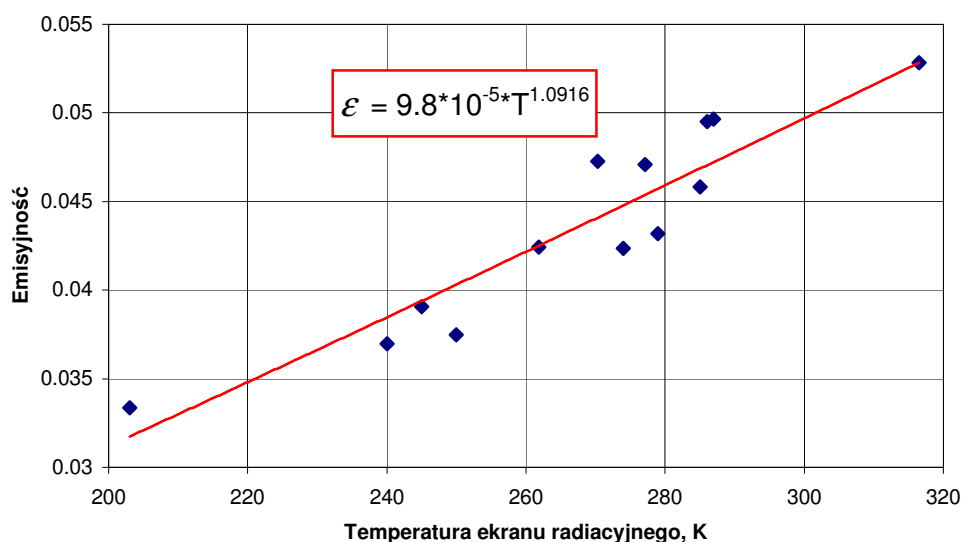
Podczas całej serii badań temperaturę ciepłej powierzchni izolacji utrzymywano na poziomie $T_1=300$ K, dzięki czemu, w zależności od konfiguracji badanej izolacji, temperatura skrajnego ekranu radiacyjnego wahała się w zakresie 200 – 285 K. W celu zwiększenia zakresu temperatury, dla którego wyznaczano wartość emisyjności powierzchni

Tabela 5-1. Zmierzone wartości wielkości niezbędnych do wyznaczenia oraz wyznaczone wartości emisyjności powierzchni ekranów radiacyjnych dla różnych konfiguracji superizolacji

	Strumień ciepła [W/m ²]	Temperatur skrajnej warstwy [K]	Temperatura ciepłej powierzchni izolacji [K]	Średnica skrajnego ekranu radiacyjnego [m]	Wyznaczona emisyjność powierzchni ekranów radiacyjnych [-]
Różna ilość zastosowanych warstw					
15 warstw	9.66	203.1	300	0.135	0.0333
20 warstw	8.52	240.4	300	0,137	0.0369
30 warstw	7.83	244.9	300	0.140	0.0390
Różna temperatura ciepłej powierzchni izolacji					
20 warstw	8.11	316.5	340		0.0528
Różna siła naciągu ekranów					
0 kg	3.21	286.0	300	0.160	0.0495
0.3 kg	4.83	277.1	300	0.140	0.0470
0.5 kg	6.10	270.3	300	0.137	0.0472
1.0 kg	6.84	261.8	300	0.136	0.0424
2.2 kg	7.55	253.4	300	0.135	0.0394
2.5 kg	7.72	252.1	300	0.135	0.0397
4.2 kg	8.43	242.6	300	0.135	0.0378
Różny stopień kompresji warstw					
$\check{N}=13.7$	3.01	287.3	300	0.160	0.0496
$\check{N}=24.3$	3.22	285.0	300	0,150	0.0458
$\check{N}=34$	4.17	279.1	300	0.141	0.0431
$\check{N}=40$	4.95	273.7	300	0.140	0.0423

ekranów przeprowadzono jeden dodatkowy pomiar, w którym temperaturę ciepłej powierzchni izolacji zwiększono do 340 K. Dla tego przypadku w obliczeniach przyjęto wartość $e_I=0.165$.

W Tabeli 5-1 zestawiono zmierzone wartości wielkości niezbędnych do wyznaczenia oraz wyznaczone wartości emisyjności powierzchni ekranów radiacyjnych dla różnych konfiguracji superizolacji. Wyniki obliczeń przedstawiono również na Rysunku 5.15.



Rysunek 5.15. Wyznaczone wartości emisyjności powierzchni ekranów radiacyjnych w funkcji temperatury

Jak wynika z Rysunku 5.15, dla temperatur ekranów radiacyjnych zbliżonych do 280 K wartości obliczonych emisyjności powierzchni ekranów wahają się w zakresie 0.04 – 0.05. Porównując dane przedstawione na Rysunku 4.12, można zauważyć, że dla takich temperatur ekranów otrzymane wartości emisyjności są zgodne z wartościami zaproponowanymi przez Jacoba [63] i Augustynowicza [3]. Natomiast dla pozostałych zakresów temperatur obliczona emisyjność powierzchni ekranów wykazuje nieco większe różnice. Na cele dalszej analizy, obliczone wartości emisyjności powierzchni ekranów zaproksymowano funkcją wykładniczą, której postać przedstawiono na Rysunku 5.15.

5.5.2. Wyznaczenie rozkładu i poziomu ciśnienia gazu rezydualnego.

Jak wynika z zależności (4.29), do wyznaczenia rozkładu i poziomu ciśnienia gazu rezydualnego w obrębie pakietu ekranów radiacyjnych niezbędne jest wyznaczenie wartości stosunku objętościowego strumienia gazu wydzielanego przez materiał izolacji j_v do współczynnika dyfuzji materiału izolacji dla przepływu gazu D . Zgodnie z wyrażeniem (4.29), przy znanej ilości zastosowanych warstw ekranów radiacyjnych N i stopniu ich kompresji $\bar{N}$ oraz dla zmierzonych ciśnień w przestrzeni próżniowej p_{ch} oraz pod badaną izolacją p_0 , wartość j_v/D można określić następująco:

$$\frac{j_v}{D} = 2 \cdot (p_0 - p_{ch}) \cdot \left(\frac{\bar{N}}{N} \right)^2 \quad (5.2)$$

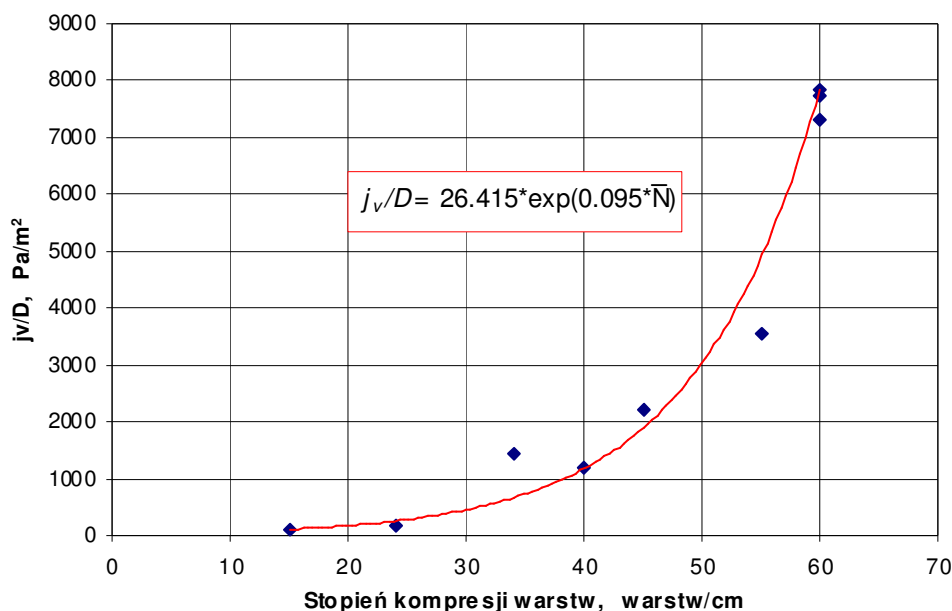
Jak wynika z Rysunku 5.4, stabilizacja wartości mierzonych ciśnień gazu w warunkach izotermicznych następowała po ok. 20 h wytwarzania próżni izolacyjnej. Jednak w trakcie

prorowadzenie badań dla niektórych konfiguracji mierzonej izolacji czas wytwarzania próżni w warunkach izotermicznych nie był wystarczająco długi, aby doszło do stabilizacji ciśnień. Dlatego do obliczeń wartości stosunku j_v/D przyjęto te przypadki pomiarów, w których czas wytwarzania próżni wynosił co najmniej 20 h. Zmierzone wartości ciśnień gazu po 20 h dla różnych konfiguracji izolacji (różna ilość warstw, różny stopień kompresji warstw) oraz obliczone wartości j_v/D zestawiono w Tabeli 5-2, a graficzną reprezentację otrzymanych wyników przedstawiono na Rysunku 5.16.

Tabela 5-2. Zmierzone wartości niezbędne do wyznaczenia oraz wyznaczone wartości stosunku j_v/D

	Stopień kompresji warstw [warstw/cm]	Ilość warstw izolacji [-]	Ciśnienie gazu w przestrzeni próżniowej (po 20 h) [Pa]	Ciśnienie gazu pod badaną izolacją (po 20 h) [Pa]	Wyznaczona wartość j_v/D [Pa/m ²]
Różna ilość zastosowanych warstw					
10 warstw	60*	10	0.002	0.0129	7848
20 warstw	60*	20	0.00236	0.043	7315
30 warstw	60*	30	0.00216	0.0988	7731
Różna siła naciągu ekranów					
0 kg	13.7	20	0.00305	0.0114	94
0.5 kg	45*	20	0.00578	0.0276	2209
2.2 kg	55*	20	0.001511	0.025007	3553
Różny stopień kompresji warstw					
$\bar{N}=24.3$	24.3	20	0.0031	0.00916	174
$\bar{N}=34$	34	20	0.0034	0.0281	1427
$\bar{N}=40$	40	20	0.00334	0.0185	1213

* - wartości średnie

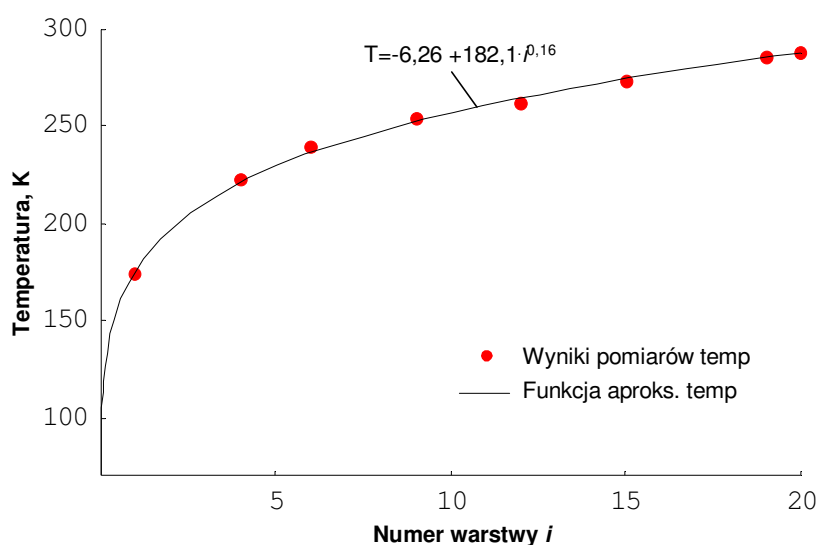


Rysunek 5.16. Wyznaczone wartości stosunku j_v/D w zależności od stopnia kompresji warstw.

Jak wynika z Rysunku 5.16, wartość j_v/D jest zależna od stopnia kompresji warstw, i rośnie eksponentalnie wraz ze wzrostem kompresji warstw. Zatem wyniki pomiarów potwierdziły przypuszczenia o pogorszeniu warunków ewakuacji gazu z przestrzeni międzywarstwowych izolacji wraz ze wzrostem stopnia kompresji warstw – patrz rozdział 4.3.3.

5.5.3. Wyznaczenie wartości przewodności cieplnej w miejscach kontaktu przekładki z przylegającymi ekranami radiacyjnymi.

Wyznaczenie przewodności cieplnej w miejscach kontaktu przekładki z przylegającymi ekranami radiacyjnymi przedstawiono na przykładzie pomiarów przeprowadzonych dla izolacji składającej się z 20 warstw ekranów radiacyjnych o stopniu kompresji 13,7 warstw/cm. W celu wyznaczenia wartości strumienia ciepła przenikających przez superizolację na drodze różnych mechanizmy wymiany ciepła niezbędne jest wyznaczenie temperatury poszczególnych ekranów radiacyjnych izolacji. Można tego dokonać przez znalezienie postaci funkcji aproksymacyjnej opisującej zmianę temperatury w zależności od numeru warstwy. W tym celu zastosowano funkcję *Fit* programu *Mathematica 4.0*, która, przez zastosowanie metody najmniejszych kwadratów, dopasowuje parametry zadanego rodzaju funkcji do podanych wartości. Na Rysunku 5.17 pokazano przebieg i postać funkcji aproksymującej (czarna linia) wartości temperatury (czerwone punkty) dla opisywanego przykładu pomiarów otrzymaną za pomocą funkcji *Fit*.



Rysunek 5.17. Przykładowa interpolacja profilu temperatury w programie *Mathematica 4.0* – wyniki pomiaru temperatury 20 warstw ekranów radiacyjnych o stopniu kompresji warstw 13.7 warstw/cm.

Ze względu na niewielkie różnice średnic pomiędzy sąsiadującymi ekranami przepływ ciepła przez superizolację w obrębie pakietu izolacyjnego można sprowadzić do przypadku płaskiego. Zgodnie z (4.12) i (4.13) ilość ciepła wymienianego na drodze promieniowania pomiędzy sąsiadującymi ekranami radiacyjnymi $i+1$ i i można określić następująco:

$$\dot{q}_{r\,i+1-i} = \sigma \cdot \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{i+1}} + \frac{1}{\varepsilon_i} - 1} (T_{i+1}^4 - T_i^4) \quad (5.3)$$

Na podstawie zależności podanych na Rysunkach 5.17 i 5.15 można wyznaczyć temperaturę i emisyjność danego ekranu radiacyjnego. Na przykład temperatura i emisyjność 2-go i 3-go ekranu radiacyjnego będą miały wartość:

$$T_2 = -6.26 + 182.1 \cdot 2^{0.16} = 196,8 \text{ K}, \quad \varepsilon_2 = 9.8 \cdot 10^{-5} \cdot T_2^{1.0916} = 0.031$$

$$T_3 = -6.26 + 182.1 \cdot 3^{0.16} = 209.5 \text{ K}, \quad \varepsilon_3 = 9.8 \cdot 10^{-5} \cdot T_3^{1.0916} = 0.033$$

Dla powyższych wartości ilość ciepła wymieniana pomiędzy tymi ekranami na drodze promieniowania wynosi:

$$\dot{q}_{r3-2} = \sigma \cdot \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_3} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} (T_3^4 - T_2^4) = 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1}{\frac{1}{0.033} + \frac{1}{0.031} - 1} (209.5^4 - 196.8^4) = 0.40 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Ciśnienie gazu rezydualnego w warunkach izotermicznych panujące w przestrzeni tworzonej przez te ekrany można wyznaczyć z zależności (4.29), w której wartość j_v/D oblicza się z wyrażenia przedstawionego na Rysunku 5.16. Dla opisywanego przypadku:

$$j_v / D = 26.415 \cdot e^{0.095 \cdot \bar{N}} = 26.415 \cdot e^{0.095 \cdot 13.7} = 97 \frac{\text{Pa}}{\text{m}^2}$$

Przyjmując, iż ciśnienie gazu w przestrzeni próżniowej $p_{ch}=2 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}$, ciśnienie gazu w rozpatrywanej przestrzeni próżniowej w warunkach izotermicznych wynosi:

$$p(i) = p_{ch} + \frac{j_v}{2D} \left(\frac{N}{\bar{N}} \right)^2 \left(1 - \left(\frac{i}{N} \right)^2 \right) = p(2) = 2 \cdot 10^{-4} + \frac{97}{2} \left(\frac{20}{13.7} \right)^2 \left(1 - \left(\frac{2}{20} \right)^2 \right) = 9.91 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}$$

Dla warunków nie izotermicznych średnia temperatura przestrzeni międzywarstwowej wynosi:

$$T_{sr \ 3-2} = \frac{T_3 + T_2}{2} = \frac{209.5 + 196.8}{2} = 203.1 \text{ K}$$

Zgodnie z (4.31), przyjmując iż wartość j_v/D wyznaczana była w temperaturze $T=300 \text{ K}$, ciśnienie gazu dla tej przestrzeni w warunkach nie izotermicznych wynosi:

$$p(2, T_{sr \ 3-2}) = p(2) \cdot \frac{T_{sr \ 3-2}}{T} = 9.91 \cdot 10^{-3} \frac{203.1}{300} = 6.5 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}$$

Strumień ciepła przewodzony przez gaz resztkowy pomiędzy rozpatrywanymi ekranami można wyznaczyć na podstawie równania (2.8) przy następujących założeniach: gaz znajduje się w warunkach molekularnych, gazem resztkowym jest powietrze ($M_0=29$, $\kappa=1.4$), wartość współczynnika akomodacji $\alpha=1$:

$$\begin{aligned}\dot{q}_{g\ 3-2} &= \left(\frac{R_u}{8\pi T_{sr\ 3-2} M_0} \right)^{0,5} \frac{\kappa+1}{\kappa-1} \cdot \frac{\alpha}{2-\alpha} \cdot p(2) \cdot (T_3 - T_2) = \\ &= \left(\frac{8314}{8\pi \cdot 203.1 \cdot 29} \right)^{0,5} \frac{1.4+1}{1.4-1} \cdot \frac{1}{2-1} 6 \cdot 10^{-3} \cdot (209.5 - 196.8) = 0.198 \frac{W}{m^2}\end{aligned}$$

Ponieważ całkowity strumień ciepła przenikający pomiędzy sąsiadującymi ekranami jest sumą promieniowania ciepła oraz przewodzenia ciepła przez gaz rezydualny i przez przekładkę, to:

$$\dot{q}_{s\ 3-2} = \dot{q} - \dot{q}_{r\ 3-2} - \dot{q}_{g\ 3-2} = 3.01 - 0.40 - 0.198 = 2.414 \frac{W}{m^2}$$

Zgodnie z wyrażeniem (4.22) ilość ciepła przewodzonego przez przekładkę można określić następująco:

$$\dot{q}_{s\ i+1-i} = h_{i+1-i} \cdot (T_{i+1} - T_i)$$

i ostatecznie można wyznaczyć przewodność cieplną na powierzchni kontaktu przekładki z przylegającymi ekranami radiacyjnymi:

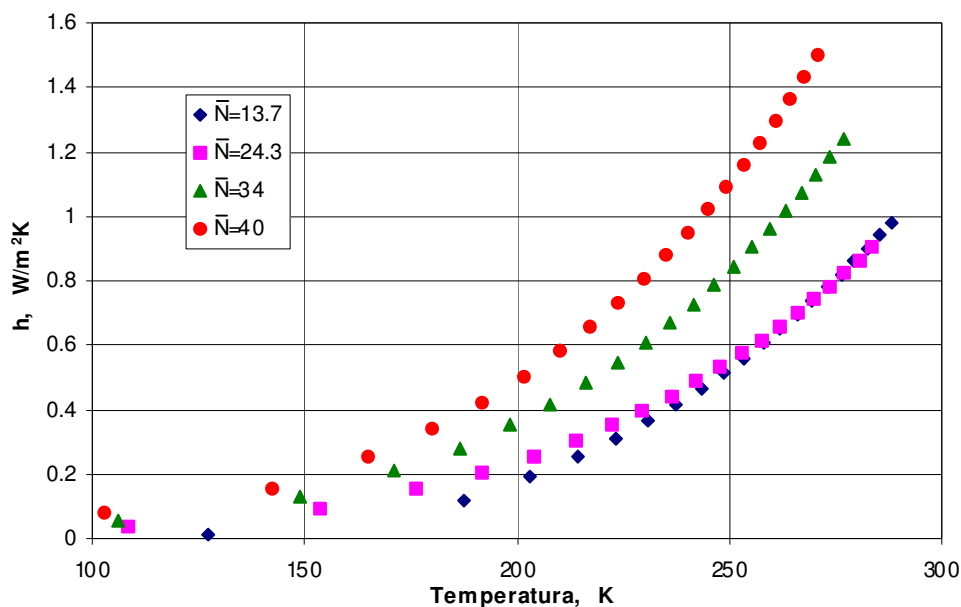
$$h_{3-2} = \frac{\dot{q}_{s\ 3-2}}{T_3 - T_2} = \frac{2.414}{290.5 - 196.8} = 0.019 \frac{W}{m^2 K}$$

W Tabeli 5-3 przedstawiono wyniki pomiarów temperatury wybranych warstw izolacji oraz wyniki obliczeń poszczególnych wartości niezbędnych do wyznaczenia przewodności cieplnej kontaktu na styku przekładki i przylegających ekranów radiacyjnych dla wszystkich warstw rozpatrywanej konfiguracji izolacji.

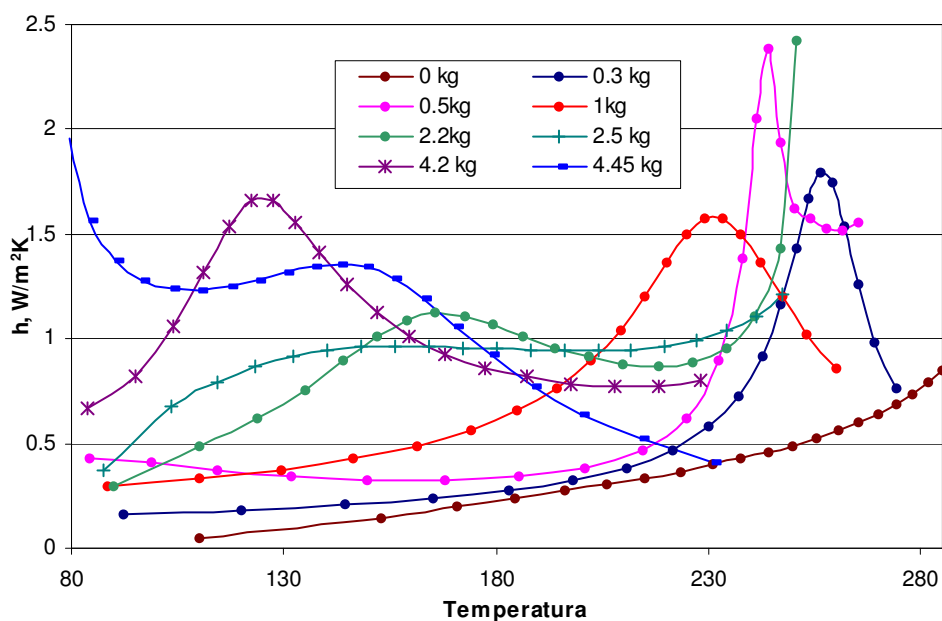
Przeprowadzenie wyżej przedstawionego toku obliczeń dla wszystkich wykonanych pomiarów prowadzi do otrzymania charakterystyk temperaturowych przewodności cieplnej kontaktu h . Na Rysunku 5.18 przedstawiono wyznaczone wartości h dla przypadku wytwarzania kompresji warstw po przez naciąg ostatniego ekranu radiacyjnego, natomiast na Rysunku 5.19 dla przypadku nawijania warstw ze stałą siłą naciągu.

Tabela 5-3. Przykładowe wyniki obliczeń przewodności cieplnej w miejscu kontaktu przekładki z przylegającymi ekranami radiacyjnymi pakietu izolacyjnego. Obliczenia przeprowadzono dla izolacji złożonej z 20 warstw ekranów radiacyjnych o stopniu kompresji 13,7 warstw/cm.

Nr warstwy i	Temperatura zmierzona	Temperatura aproksymowana	$T_{sri+l-i}$	ε_i	q_{ri+l-i}	$p(i, T_{sri+l-i})$	q_{gi+l-i}	q_{si+l-i}	h_{i+l-i}
	K	K	K	-	W/m ²	10 ⁻³ Pa	W/m ²	W/m ²	W/m ² K
0 (pow. zimna)	77.3	77.3		0.100					
			127.4		1.22	5.9	0.662	1.124	0.011
1	173.9	177.8		0.028					
			187.3		0.42	6.5	0.302	2.283	0.120
2	-	196.8		0.031					
			203.1		0.40	6.9	0.198	2.414	0.190
3	-	209.5		0.033					
			214.4		0.38	7.1	0.149	2.477	0.252
4	222.4	219.3		0.035					
			223.4		0.38	7.2	0.119	2.515	0.309
5	-	227.4		0.037					
			230.9		0.37	7.3	0.099	2.541	0.364
6	239.8	234.4		0.038					
			237.5		0.37	7.2	0.084	2.560	0.416
7	-	240.6		0.039					
			243.4		0.36	7.2	0.072	2.574	0.465
8	-	246.1		0.040					
			248.6		0.36	7.0	0.062	2.586	0.514
9	253.7	251.2		0.041					
			253.5		0.36	6.8	0.054	2.596	0.561
10	-	255.8		0.042					
			257.9		0.36	6.5	0.047	2.604	0.606
11	-	260.1		0.042					
			262.1		0.36	6.2	0.041	2.611	0.651
12	261.4	264.1		0.043					
			266.0		0.36	5.8	0.036	2.617	0.694
13	-	267.9		0.044					
			269.6		0.36	5.4	0.031	2.623	0.737
14	-	271.4		0.044					
			273.1		0.36	4.9	0.026	2.627	0.779
15	273.2	274.8		0.045					
			276.4		0.36	4.3	0.022	2.632	0.821
16	-	278.0		0.046					
			279.5		0.36	3.7	0.018	2.636	0.862
17	-	281.1		0.046					
			282.5		0.36	3.0	0.014	2.640	0.902
18	-	284.0		0.047					
			285.4		0.36	2.3	0.011	2.644	0.942
19	286.1	286.8		0.047					
			288.1		0.36	1.5	0.007	2.647	0.981
20	287.9	289.5		0.048					
			294.2		3.01	0.2	0.005	0	0
21 (pow. ciepła)	-	300		0.161					



Rysunek 5.18. Wyznaczone wartości przewodności cieplnej kontaktu pomiędzy przekładką a sąsiadującymi ekranami radiacyjnymi dla różnego stopnia kompresji warstw.



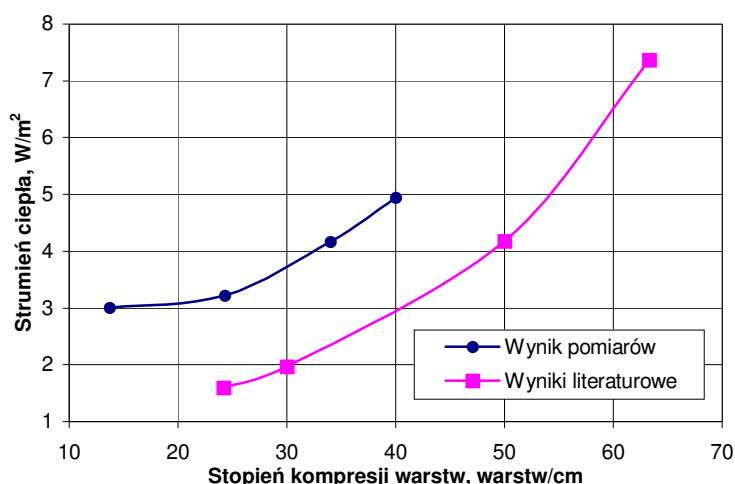
Rysunek 5.19. Wyznaczone wartości przewodności cieplnej kontaktu pomiędzy przekładką a sąsiadującymi ekranami radiacyjnymi dla różnej siły naciągu warstw.

5.6. Wnioski z przeprowadzonych badań i obliczeń

Uzyskane wyniki pomiarów strumieni ciepła przepływającego przez superizolacje w zależności od ilości zastosowanych warstw ekranów radiacyjnych (Rysunek 5.8) wskazują, że zwiększanie ilości warstw ekranów radiacyjnych izolacji pracującej w zakresie temperatur 300 – 77.3 K poprawiają efektywność izolacji. Jest to wynik jakościowo zgodny z wynikami pomiarów prezentowanymi w literaturze – patrz Rysunek 4.4. Dużo większe wartości strumieni ciepła uzyskane podczas pomiarów w porównaniu z wynikami literaturowymi

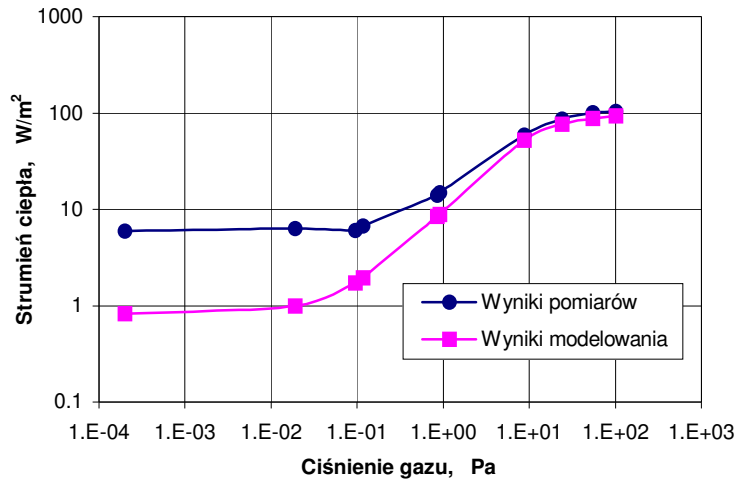
wynikają między innymi z bardzo dużej kompresji warstw badanej izolacji, podczas gdy dane literaturowe odnoszą się do izolacji o małym stopniu kompresji.

Na Rysunku 5.20 zestawiono wyniki pomiarów i danych literaturowych [5] skuteczności izolacji w zależności od stopnia kompresji warstw. Jak widać również w tym przypadku wyniki uzyskane na drodze eksperymentalnej w sposób ilościowy znacznie odbiegają od wyników dostępnych w literaturze. Natomiast charakter zmian zmierzonych strumieni ciepła wraz ze wzrostem kompresji warstw jest jakościowo zgodny z danymi literaturowymi. Przyczyna otrzymywanych niezgodności ilościowych prawdopodobnie wynika z zastosowania innych materiałów do wykonywania poszczególnych izolacji. Należy zwrócić uwagę, iż dla 20 warstw superizolacji o małym stopniu kompresji warstw pracującej w zakresie temperatur 300 – 77.3 K, typowe wartości ciepła przenikające przez superizolację wynoszą ok. 1.2 – 1.5 W/m² – porównaj Rysunek 4.4 oraz Tabela A-1. Nie mniej jednak niektóre opublikowane wartości zmierzonych strumieni ciepła dla podobnych konfiguracji izolacji są zbliżone do wartości otrzymanych eksperymentalnie, np. Jacob i inni [62] dla 18 warstw izolacji wyznaczyli strumień ciepła o wartości 3.36 W/m², podczas, gdy dla pomiarów 20 warstw ekranów radiacyjnych o małym stopniu kompresji wyznaczono strumień ciepła o wartości 3.01 W/m².



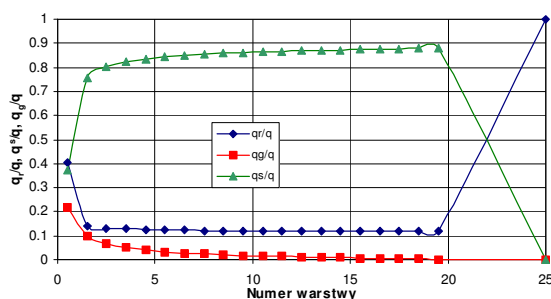
Rysunek 5.20. Porównanie wyników pomiarów i wyników literaturowych skuteczności superizolacji w zależności od stopnia kompresji warstw, wyniki literaturowe – Bapat [5] dla 20 warstw izolacji

Porównanie wyników przepływu ciepła przez superizolację w zależności od ciśnienia gazu panującego w przestrzeni próżniowej otrzymanych na drodze modelowania matematycznego z wynikami otrzymanymi eksperymentalnie przedstawia Rysunek 5.21. Jak widać, wyniki pomiarów są zbieżne z wynikami modelowania dla wysokich zakresów ciśnień, a więc w warunkach w którym ciepło przewodzone jest przez izolację głównie przez gaz. Oznacza to, że zaproponowane w pracy wyrażenie (4.6) do opisu przewodzenia ciepła przez rozrzedzone gazy, uwzględniające wszystkie warunki (molekularne, przejściowe oraz lepkie), w jakich to zjawisko może zachodzić, pozwala na bardzo dokładne określenie ilości ciepła przenikającego przez izolację za pośrednictwem tego mechanizmu. Duże różnice pomiędzy porównywanymi wartościami dla niskich zakresów ciśnienia gazu wynikają z faktu, iż w tych warunkach przewodzenie ciepła przez gaz nie jest dominującym mechanizmem transportu ciepła przez izolację.

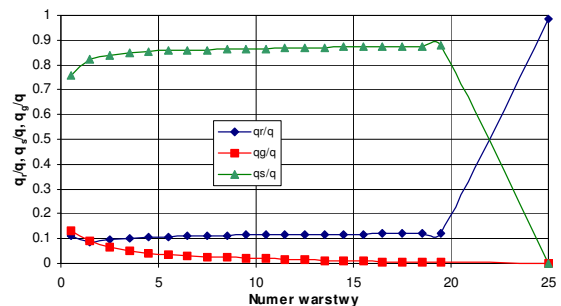


Rysunek 5.21. Porównanie wyników pomiarów i wyników modelowania skuteczności superizolacji w zależności od ciśnienia gazowego resztkowego w przestrzeni próżniowej izolacji.

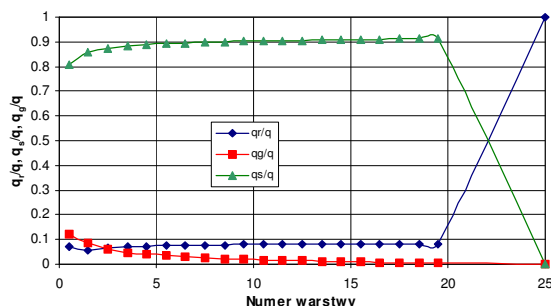
Porównując wartości strumienia ciepła zmierzonego dla izolacji, której poszczególne warstwy ekranów radiacyjnych zostały nałożone na powierzchnię izolowaną (Rysunek 5.18, stopień kompresji warstw 13.7 warstw/cm) oraz dla izolacji, których warstwy uzyskano po przez nawinięcie ekranów radiacyjnych (Rysunek 5.19, siła naciągu warstw 0 kg) widać, iż metoda polegająca na nakładaniu warstw ekranów radiacyjnych pozwala uzyskać lepszą skuteczności izolacji, przy zastosowaniu takiej samej ilości warstw ekranów radiacyjnych. W tym wypadku ilość ciepła przenikającego izolację nawiniętą na powierzchnię izolowaną była o 0.22 W/m^2 , a więc o ponad 7% większa niż w przypadku izolacji o warstwach nakładanych. Oznacza to, że dość duże ilości ciepła może być transportowana do obszaru izolowanego



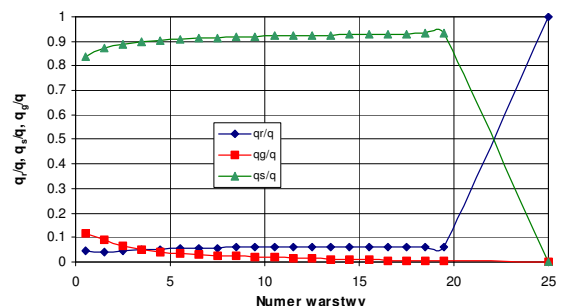
$\bar{N} = 13.7$ warstw/cm



$\bar{N} = 24,3$ warstw/cm



$\bar{N} = 34$ warstw/cm



$\bar{N} = 40$ warstw/cm

Rysunek 5.22. Względny udział poszczególnych mechanizmów wymiany ciepła w procesie przenikania ciepła przez wielowarstwową izolację próżniową dla różnego stopnia upakowania warstw izolacji, q_r – ciepło wymieniane na drodze promieniowania cieplnego, q_g – ciepło przewodzone przez gaz rezydualny, q_s – ciepło przewodzone przez przekładkę.

również przez materiał ekranów radiacyjnych.

Na Rysunku 5.22 przedstawiono obliczone względne udziały poszczególnych mechanizmów transportu ciepła w procesie wymiany ciepła pomiędzy poszczególnymi powierzchniami super izolacji. Na poszczególnych rysunkach powierzchnię ciepłą izolacji oznaczono jako warstwę numer 25. Jak widać w obrębie pakietu izolacyjnego mechanizmem dominującym w transporcie ciepła przez izolację jest przewodzenie ciepła przez przekładkę. Jedynie dla małego stopnia kompresji warstw, pomiędzy najbardziej wewnętrznymi warstwami izolacji dość znaczący jest transport ciepła po przez promieniowanie i przewodzenie przez gaz rezydualny. Dla innych kompresji warstw obydwa mechanizmy transportują nie więcej niż ok. 15 % całkowitego ciepła przenikającego przez pakiet izolacji. Natomiast pomiędzy skrajnym ekranem radiacyjnym a powierzchnią ciepłą izolacji ciepło wymieniane jest w zasadzie jedynie na drodze promieniowania.

Wyznaczone analitycznie wartości przewodności ciepła h w miejscach kontaktu przekładki i przylegających ekranów radiacyjnych dla różnego stopnia kompresji warstw (Rysunek 5.18) wskazują, iż zmiana stopnia kompresji warstw z 13.7 do 24.3 warstw/cm w zasadzie nie wpływa na wzrost wartości parametru h . Dopiero przy dalszym zwiększeniu stopnia kompresji warstw, przy wyznaczaniu strumienia ciepła przenikającego przez wielowarstwową izolację próżniową należy uwzględnić wzrost wartości przewodności kontaktu h . Zatem otrzymane wyniki potwierdzają tezę niniejszej pracy, mówiącą o tym, że wzrost ilości ciepła przewodzonego przez przekładki wraz ze wzrostem wartości stopnia kompresji warstw superizolacji należy uwzględniać dopiero, gdy stopień kompresji warstw jest większy od wartości typowych (30 warstw/cm).

Przedstawione na Rysunku 5.19 wartości parametru h wyznaczone dla izolacji, których poszczególne warstwy zostały nawinięte ze stałą siłą naciągu wykazują bardzo duże wahania przy zmianie temperatury. W zasadzie dla wszystkich przypadków, poza izolacją nawiniętą bez naciągu warstw, wyznaczone wartości przewodności cieplnej kontaktu h mają następującą charakterystykę: dla niskich temperatur wartość h są stosunkowo małe, ale wraz ze wzrostem temperatury bardzo szybko rosną uzyskując maksimum, aby następnie maleć. Prawdopodobnie taka charakterystyka jest wynikiem metody nawijania warstw, ponieważ każda kolejno nawijana warstwa powoduje kompresję warstw już nawiniętych, tak więc kompresja warstw na grubości otrzymanej izolacji nie jest jednolita i można się spodziewać, że ciśnienie kontaktu pomiędzy warstwami znajdującymi się najbliżej powierzchni izolowanej jest znacznie większe niż w przypadku warstw znajdujących się na zewnątrz pakietu izolacyjnego. A więc ciśnienie kontaktu na wskroś izolacji będzie maleć wraz z jej grubością. Jak wynika z wyznaczonych analitycznie wartości parametru h dla przypadku jednolitej kompresji warstw (Rysunek 5.18), parametr ten rośnie zarówno ze wzrostem temperatury jak i ciśnienia kontaktu pomiędzy warstwami. Dlatego dla niskich temperatur, ale wysokiej kompresji wewnętrznych warstw izolacji wartości h są stosunkowo małe a wzrost wartości h dla kolejnych warstw jest wynikiem szybkiego wzrostu ich temperatury. Natomiast dla zewnętrznych warstw izolacji zmiany temperatury są niewielkie, natomiast ciśnienie kontaktu szybko maleje, przez co wartości h dla tych warstw izolacji również maleją. Dokładna analiza charakteru zmiany przewodności cieplnej kontaktu h dla takiej metody nawijania warstw wymaga przeprowadzenia dodatkowych badań eksperymentalnych pozwalających na określenie zmiany ciśnienia kontaktu pomiędzy poszczególnymi warstwami izolacji wraz ze wzrostem ilości nawijanych warstw.

6. Podsumowanie i wnioski wynikające z pracy.

Dążenie do jak najmniejszych nakładów pracy urządzeń kriogenicznych, ograniczenie strat skroplonych gazów znajdujących się w instalacjach kriogenicznych oraz bezpieczeństwo pracy przy obecności takich urządzeń wymaga stosowania wysokoefektywnych izolacji termicznych. Z pośród technicznie dostępnych izolacji termicznych stosowanych w technice kriogenicznej najlepszymi właściwościami izolacyjnymi charakteryzuje się wielowarstwowa izolacja próżniowa, zwana również superizolacją. Pomimo, iż superizolacja wykorzystywana jest na skalę przemysłową od ponad 40 lat, nadal trwają prace nad poprawą jej właściwości i optymalizacją.

W pracy dokonano szczegółowego przeglądu literatury dotyczącej aspektów związanych z wielowarstwową izolacją próżniową. Szczególną uwagę zwrócono na publikowane wyniki pomiarów strumieni ciepła przenikającego przez taką izolację w zależności od jej budowy. Pozwoliło to na wytypowanie grupy parametrów i cech mających najistotniejszy wpływ na właściwości wielowarstwowych izolacji próżniowych. Na podstawie analizy procesów wymiany ciepła zachodzące podczas przepływu ciepła przez taką izolację, wskazano również grupę właściwości fizycznych materiałów służących do wykonywania superizolacji, mających wpływ na jej efektywność.

Opracowanie modelu matematycznego opisującego przepływ ciepła przez superizolację przy uwzględnieniu wytypowanych parametrów pozwoliło na przeprowadzenie obliczeń optymalizacyjnych izolacji wielowarstwowej.

Bazując na modelu przygotowano program komputerowy, który na podstawie grupy danych wejściowych składającej się z wytypowanych parametrów izolacji, wyznacza strumień ciepła przenikających izolację o danej konfiguracji.

Wskazano duże rozbieżności pomiędzy wynikami otrzymywanych na drodze modelowania matematycznego i danymi literaturowymi dotyczącymi skuteczności izolacji przy dużym stopniu kompresji warstw. Jako przyczyny otrzymywanych niezgodności uznano wzrost ciśnienia gazu rezydualnego oraz wzrost przewodności cieplnej kontaktu pomiędzy przekładkami a przylegającymi do nich ekranami radiacyjnymi wraz ze wzrostem stopnia kompresji warstw.

Zaproponowano metodykę eksperymentalnego określenia zmian tych parametrów. W celu przeprowadzenia badań eksperymentalnych opracowano koncepcję działania, konstrukcję oraz wybudowano kalorymetryczny kriostat cylindryczny. Uzyskane wyniki pomiarów skuteczności superizolacji oraz analityczne określenie m.in. zmiany wartości przewodnictwa cieplnego kontaktu w zależności od stopnia kompresji warstw izolacji pozwoliły na potwierdzenia tezy głównej pracy. Mianowicie stwierdzono, że dla małych wartości stopnia kompresji warstw ekranów radiacyjnych wielowarstwowych izolacji próżniowych wzrost stopnia kompresji warstw nie wpływa na ilość ciepła przewodzonego przez przekładki ekranów radiacyjnych. Dopiero zwiększenie wartości kompresji warstw ponad wartości typowe (około 30 warstw/cm) powoduje konieczność uwzględnienia wzrostu ilości ciepła przewodzonego przez przekładki.

Otrzymane dane eksperymentalne pozwoliły również na weryfikację wartości emisyjności powierzchni ekranów radiacyjnych w zależności od ich temperatury oraz na określenie wpływu ciśnienia gazu rezydualnego na transport ciepła przez izolację. Równocześnie weryfikacji eksperymentalnej podano zaproponowane wyrażenie opisujące przepływ ciepła przez gaz dla szerokiego zakresu ciśnień gazów rozrzedzonych otrzymując bardzo dobrą zgodność wartości teoretycznych i pomiarowych.

Wnioski szczegółowe.

1. Wielowarstwowa izolacja próżniowa, zwana również superizolacją, w porównaniu z technicznie dostępnymi kriogenicznymi izolacjami termicznymi, charakteryzuje się najlepszymi właściwościami izolacyjnymi w zasadzie dla wszystkich warunków pracy takich izolacji
2. Izolacja taka wykazuje również dobre właściwości w stanach awaryjnych, polegających na nagłej utracie próżni w wyniku pęknięcia osłony próżniowej
3. Największy wpływ na właściwości superizolacji ma zakres temperatur pracy izolacji, ilość zastosowanych warstw ekranów radiacyjnych, stopień ich kompresji, ciśnienie i rodzaj gazu wypełniającego przestrzeń próżniową oraz niektóre właściwości fizyczne materiałów wykorzystywanych do wykonania superizolacji (emisyjność ekranów radiacyjnych, współczynnik przewodzenia ciepła przekładki)
4. Zwiększanie ilości zastosowanych warstw ekranów radiacyjnych izolacji pracującej w niektórych zakresach temperatur, np. 77.3 – 4 K, może powodować pogorszenie właściwości superizolacji
5. Przepływ ciepła przez wielowarstwową izolację próżniową można opisać za pomocą modelu matematycznego, w którym uwzględnienia się jedynie zmianę wartości emisyjności powierzchni ekranów radiacyjnych i zmianę wartości współczynnika przewodzenia ciepła materiału przekładki wraz z temperaturą oraz przyjmuje się jednolity rozkład ciśnienia gazu w obrębie ekranów radiacyjnych. Wartości strumieni ciepła przenikających przez superizolację otrzymane na drodze modelowania matematycznego wykazują dużą zgodność z wynikami pomiarów dostępnych w literaturze, przeprowadzonych dla izolacji o małym stopniu kompresji warstw.
6. Przy modelowaniu przepływu ciepła przez superizolację o dużym stopniu kompresji warstw należy uwzględnić wzrost przewodności cieplnej w miejscach kontaktu przekładki z sąsiadującymi ekranami radiacyjnymi.
7. Głównym mechanizmem wymiany ciepła w obrębie warstw ekranów radiacyjnych superizolacji o niewielkiej ilości zastosowanych warstw jest przewodzenie ciepła przez przekładki.
8. Eksperymentalne wartości strumieni ciepła przenikających przez wielowarstwowe izolacje próżniowe otrzymane podczas przeprowadzonych badań wykazują bardzo dobrą zgodność ilościową i jakościową z wynikami pomiarów opublikowanych w literaturze dla analogicznych konfiguracji i warunków pracy superizolacji. Przyczyny ilościowych odstępstw pomiędzy otrzymanymi a niektórymi publikowanymi wynikami pomiarów upatruje się w różnicy jakości materiałów zastosowanych do wykonania poszczególnych izolacji wielowarstwowych.

Wnioski praktyczne:

1. W układach, w których niskotemperaturowe elementy urządzeń i instalacji kriogenicznych izoluje się termicznie bezpośrednio od temperatury otoczenia (układy bez czynnie chłodzonych ekranów radiacyjnych, zakres temperatur pracy izolacji: 300 – 77.3 K, 300 – 4.2 K) należy stosować od 40 do 60 warstw superizolacji. Zwiększanie w takim przypadku ilości zastosowanych warstw ponad tą wartość nie powoduje znacznej poprawy efektywności izolacji, zwiększa natomiast czas niezbędny do wytworzenia odpowiednio wysokiego poziomu próżni izolacyjnej.
2. W układach izolacyjnych, w których do izolowania ciekłego helu wykorzystuje się ekrany radiacyjne czynnie chłodzone ciekłym azotem zaleca się, aby na powierzchni

izolowanej umieszczać od 10 do 15 warstw superizolacji. Superizolacja o takiej ilości warstw przy wysokim poziomie próżni izolacyjnej wykazuje nieznacznie gorsze właściwości niż izolacja próżniowa (patrz – Rysunek 4.19). Natomiast, w przeciwieństwie do izolacji próżniowej, mocno ogranicza dopływ ciepła do powierzchni izolowanej w przypadku powolnej degradacji próżni lub jej nagłej utraty (patrz – Rysunek 4.9).

3. Zwiększanie ilości ekranów radiacyjnych umieszczonych przy cieplej powierzchni izolacji zwiększa efektywność izolacji niezależnie od zakresu temperatur pracy izolacji. Przy wysokich poziomach próżni izolacyjnej w układach z czynnie chłodzonymi ekranami radiacyjnymi takie rozwiązanie powoduje uzyskanie najlepszych efektów izolacyjnych (patrz – Rysunek 4.19). Jednak materiał izolacji nie chroni powierzchni izolowanej w przypadku nagłej utraty próżni. Z tego względu, o ile nie istnieje możliwość prawidłowego umiejscowienia ekranów na zimnej powierzchni izolacji (np. w zespołach zaworów i wymienników ciepła znajdujących w jednej osłonie próżniowej), nie zaleca się umieszczania ekranów radiacyjnych przy cieplej powierzchni izolacji.

7. Literatura

1. Allen M. S., Baumgartner R. G., Fesmire J. E., Augustynowicz S. D., *Advances in microsphere insulation systems*, Advances in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, Vol. 49, Melville, New York, 2004, s. 619 – 626
2. Amano T., Ohara A. Yamada T., *Effects of a radiation system and a wrapping method of multilayer insulation on heat transfer in cryogenic systems*, Proceedings of the Twelfth International Cryogenic Engineering Conference, Butterworth, Guildford, England, 1988, s.162 - 165
3. Augustynowicz S.D., Demko J.A., Datskow V. I., *Analysis of multilayer insulation between 80 K and 300 K*, Advances in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, Vol.39, Plenum Press, New York, 1994, s.1675 - 1662
4. Augustynowicz S.D, Fesmire J.E. Wikstrom J.P., *Cryogenic insulation systems*, Proceedings of XX international Congress of Refrigeration IIR/IIF, Sydney 1999
5. Bapat, S. L., Narayankhedkar, K. G., Lukose, T. P., *Experimental Investigation of Multilayer Insulation*, Cryogenics, Vol. 30, Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 1990, s. 711-719
6. Bapat, S. L., Narayankhedkar, K. G., Lukose, T. P., *Performance Predictions of Multilayer Insulation*, Cryogenics, Vol. 30, Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 1990, s. 700-710
7. Barron R.F., *Cryogenic heat transfer*, Taylor & Francis 1999
8. Barth W., Lehmann W., *Experimental investigations of superinsulation models equipped with carbon paper*, Cryogenics, Vol. 28, Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 1988, s. 317 - 320
9. Barth W., Lehmann W., Henry C., Walther R., *Test results for a high quality industrial superinsulation*, Cryogenics, Vol. 28, Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 1988, s. 607 - 609
10. Bell, G. A., Nast, T. C., Wedel, R. K., *Thermal performance of multilayer insulation applied to small cryogenic tankage*, Advances in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, Vol. 22, Plenum Press, New York, 1977, s. 272-282.
11. Benda V., CERN Genewa, Szwajcaria – informacja własna
12. Benda V., Bozzini D., Riddone G., Vandoni G, *Measurement on different MLI systems between 77 K and 4.2 K and their application in cryogenic engineering*, CERN, LHC-NOTE-457, Genewa, Szwajcaria 2000
13. Benda V, Lebrun Ph., Mazzone L., Sergo V., Vullierme B, *Qualification of multilayer insulation systems between 80 K and 4.2 K*, Proc. Cryogenics 2000, International Institute of Refrigeration, Praha, 10 – 13 October 2000
14. Benda V, Dufay L., Ferlin G., Lebrun Ph., Rieubland J-M., Riddone G., Szeless B., Tavian L., Williams L., *Measurement and analysis of thermal performance of LHC cryostats*, CERN, LHC-NOTE-347, Genewa, Szwajcaria 1995

15. Bodio E.: Skraplarki i chłodziarki kriogeniczne; skrypt Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1987
16. Boroski W. N., Nicol T. H., Scho C. J., *Thermal performance of various multilayer insulation system below 80K*, Cryogenics, Vol. 32, Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 1992, s. 48 – 51
17. Boroski, W. N., Gonczy, J. D., Niemann, R. C., *Thermal performance measurements of a 100 percent polyester mli system for the superconducting super collider; part I: Instrumentation and experimental preparation (300K - 80K)*, Advance in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, Vol. 35, Kulwer Academic, Plenum Publisher, 1990, s. 487-496
18. Boroski, W. N., Gonczy, J. D., Niemann, R. C., *Thermal performance measurements of a 100 percent polyester MLI system for the superconducting super collider; part II: Laboratory results,(300K - 80K)*, Advance in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, Vol. 35, Kulwer Academic, Plenum Publisher, 1990, s. 497-506
19. Boroski, W. N., Kunzelman R.J., Ruschman M.K., *Design and calibration of a test facility for MLI thermal performance measurements below 80 K*, Advance in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, Vol. 35, Kulwer Academic, Plenum Publisher, 1992, s. 275 - 283
20. Bunger U., Owren G., *Development Potentials for Small Mobile Storage Tanks with Vacuum Powder Insulation*, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 23, No. 4, Elsevier Science Ltd., 1998, s. 273-279,
21. Burmeister, H., Eschricht, W., Horlitz, G., Sellmann, D., Ye, J.-D., *Test of multilayer insulations for the use in the Superconducting Proton-Ring of HERA*, Advance in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, Vol. 33, Kulwer Academic, Plenum Publisher, 1988, s. 313-322
22. Chaussy J. , Gianese P., Peyrard J., *Reduction of evaporation ate by use of metallic adhesive tape*, Cryogenics, Vol. 32, Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 1976, s. 617-618
23. Chen G., Sun T., Zheng J., Yu J., *Performance of multilayer insulation with slotted shield*, Cryogenics, Vol. 34, ICEC Supplement, Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 1994, s. 381-384
24. Chorowski M., Grzegory P., Parente C., Riddone G., *Experimental and mathematical analysis of multilayer insulation below 80 K*, Proceedings of the Eighteenth International Cryogenic Engineering Conference, Narosa Pub. House, New Delhi, 2000, s. 347-350
25. Chorowski M., Grzegory P., Parente C., Riddone G, *Optimisation of multilayer insulation – an engineering approach*, CERN, LHC-NOTE-464, Genewa, Szwajcaria 2001
26. Chorowski M., Konopka G., Riddone G., *Helium discharge and dispersion in the LHC accelerator tunnel in case of cryogenic failure*, Proceedings of the Eighteenth International Cryogenic Engineering Conference, Mumbia, India 2000, s. 231-234
27. Chorowski M., Poliński J., *Budowa, parametry i optymalizacja kriogenicznej wielowarstwowej izolacji próżniowej – superizolacji*, Chłodnictwo, nr 9, Sigma-Not, Warszawa, 2003, s. 26-33

28. Chorowski, M., Polinski, J., *Modelling of multilayer vacuum insulation – complexity versus accuracy*, Proceedings of the Twenty International Cryogenic Engineering Conference, Elsevier Science Ltd., 2006, s. 793-769
29. Chorowski M., Polński J., *Termodynamiczna optymalizacja kriostatu do badań cieplnych przewodów z nadprzewodnika Nb₃Sn*. Elektronika 46 nr 7, Sigma – Not, Warszawa, 2005, s. 11-15
30. Corruccini R.J., *Calculation of gaseous heat conduction in dewars*, Advance in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, vol. 3, Kulwer Academic, Plenum Publisher, 1958, s. 353 – 366
31. Coston R. M., *Handbook of thermal design data for multilayer insulation systems*, MISSILES & SPACE COMPANY, Sunnyvale, 1967.
32. Cunnington G.R., Keller C.W, Bell G.A., *Thermal performance of multilayer insulation – interim report*, NASA CR 72605, 1971 r
33. Datta T.S., Inter University Accelerator Center, New Delhi, Indie – informacja własna
34. Daly E., Pletzer R., *Analysis of ER string test thermally instrumented interconnect 80-K MLI blanket*, Supercollider 5, Plenum Press, New York, 1993, s. 323-326
35. Davydenkov I.A., Miliman S.B., Velikanova M.G., Kotov L.E., Pperestronin A.G., *Study of Dewar multishield insulation systems at 4.2 and 293K*, Cryogenics, Vol. 33, Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 1993, s. 1137 – 1141
36. Dube, W. P.; Sparks, L. L.; Slifka, A. J., *Apparatus for measurement of thermal conductivity of insulation systems subjected to extreme temperature differences*, Advance in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference (Materials), Vol. 36, Plenum Press, New York, 1988, s. 853 - 859
37. Dube, W. P.; Sparks, L. L.; Slifka, A. J., *NBC boil-off calorimeter for measuring thermal conductivity of insulating materials*, Advance in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference (Materials), Vol. 34, Plenum Press, New York, 1988, s. 67 – 73
38. Dufay L., Policella C., Rieubland J.-M., Vandoni G., *A large-scale test facility for heat load measurements down to 1.9 K*, Advance in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, Vol. 47, Melville, New York, 2002, s. 98-105
39. Eyssa Y. M., Okasha O., *Thermodynamic optimization of thermal radiation shields for a cryogenic apparatus*, Cryogenics, Vol. 18, Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 1978, s. 305 – 307
40. Fesmire J.E., *Aerogel insulation systems for space launch applications*, Space Cryogenics Workshop, Colorado Springs – informacja własna
41. Fesmire J.E., Augustynowicz S.D, *Thermal performance testing of glass microspheres under cryogenic vacuum condition*, Advances in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, vol. 49, Melville, New York, 2004, s. 612-618.
42. Fesmire J.E., Augustynowicz S.D, Darve C., *Performance characterization of perforated multilayer insulation blankets*, Proceedings of the Nineteenth International Cryogenic Engineering Conference, Narosa Publishing House, 2002, s.843 - 846

43. Fesmire J.E., Augustynowicz S.D., Nagy Z.F., Sojourner S.J., Morris D.L., *Vibration and thermal cycling effects on bulk-fill insulation materials for cryogenic tanks*, Advances in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, vol. 51, Melville, New York, 2006s. 1359-1366
44. Fesmire J.E., Augustynowicz S.D., Nagy Z.F., Sojourner S.J., Shu Q. S., Cheng G., Susta J.T., *Testing of prototype magnetic suspension cryogenic transfer line*, Advances in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, vol. 51, Melville, New York, 2006 s. 539-546
45. Fesmire J.E., Augustynowicz S.D., Rouanet S., *Aerogel beads as cryogenic thermal insulation system*, Advances in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, vol. 47, Melville, New York, 2002, s. 1541 - 1548
46. Flynn T. M. , *Cryogenic Engineering – second edition*, Dekker, New York, 2004
47. Franks D.E., Pletzer R.K, *The effect of vacuum gas pressure and species on internal heat lake in the SSC/L magnet design*, Supercollider 4, Plenum Press, New York, 1992, s.267 – 274
48. Getmanets V. F., Goncharenko L. G., Mikhalchenko R. S., Pershin N. P., Zhun G. G. Stears H.,*The single component superinsulation*, Cryogenics, Vol. 39, Butterworth & Co (Publishers) Ltd.,1999, s.1037 - 1038
49. Glassford, A. P. M., Liu, C. K., *Effect of temperature and preconditioning on the outgassing rate of double aluminized Mylar and Dacron net*, Journal of Vacuum Science Technology, Vol. 2, nr. 3, 1984, s. 1370-1377
50. Glassford, A. P. M., Liu, C. K., *Outgassing Rate of Multilayer Insulation Materials at Ambient Temperature*, Journal of Vacuum Science Technology, Vol. 17, nr. 3, 1980, s. 696-704
51. Gonczy J.D., Boroski W.N., Niemann R.C., *Multilayer insulation (MLI) in the superconducting super collider: a practical engineering approach to physical parameters governing mli thermal performance*, Advance in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, vol. 35, Kulwer Academic, Plenum Publisher, 1990, s. 483- 491
52. Gonczy J.D., Boroski W.N., Niemann R.C., Otavka J.G., Ruschman M.K., Schoo C.J.,*A blanket design, apparatus and fabrication techniques for the mass production of multilayer insulation blankets for the superconducting super collider*, Advance in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, vol. 35, Kulwer Academic, Plenum Publisher, 1990, s. 507-516
53. Green M.A., *Radiation and gas conduction heat transport across a helium dewar multilayer insulation system*, LBL – 36132, Lawrence Berkeley Laboratory, 1994
54. Groszkowski J., *Technika wysokiej próżni*. WNT, Warszawa 1978
55. Grzegory P., Chorowski M., Gnutek Z., *Analiza procesu przekazywania ciepła przez izolację rurociągu kriogenicznego przeznaczonego do transportu ciekłego azotu*, X Sympozjum Wymiany Ciepła i Masy, Oficyna Wydawnicza PWr., Wrocław, 1998, s. 316-321
56. Gung C., Hwang P., Minervini J. V., Schultz J. H., Sabbi G., Seidl P., Martovetsky N *Cryostat with Low-Emissivity Foil and Multilayer Insulation*, Advances in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, vol. 51, Melville, New York, 2006 s. 1343-1350.

57. Hałas A., *Technologia wysokiej próżni*, PWN, Warszawa 1980.
58. Hanzelka P., *Numerical modelling in cryostat design: methods and experimental verification*, Cryogenics, Vol. 33, Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 1993, s.454 – 458
59. Harrison M., *Loss of Vacuum Experiments on a Superfluid Helium Vessel*, Space Cryomagnetics Technical Report:
http://www.scientificmagnetics.co.uk/pdf/pub/WEPO3D3_04.pdf
60. Hedayat A., Hastings L. J., Brown T., *Analytical modeling of variable density multilayer insulation for cryogenic storage*, Advances in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, Vol. 47, Melville, New York, 2002, s. 1557-1564
61. Hobler T., *Ruch ciepła i wymienniki*, WNT, Warszawa 1971
62. Jacob S., Kasthuriengan S., Karunanithi R., *Investigation into the thermal performance of multilayer insulation (300-77 K), Part I: Calorimetric study*. Cryogenics, Vol. 32, Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 1992, s. 1137-1146
63. Jacob S., Kasthuriengan S., Karunanithi R., *Investigation into the thermal performance of multilayer insulation (300-77 K), Part II : Thermal analysis*, Cryogenics, Vol. 32, Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 1992, s. 1147-1153
64. Jacob S., Kasthuriengan S., Karunanithi R., Manjunatah, *Heat transfer analysis in multilayer insulation systems*, Proceedings of the Twelfth International Cryogenic Engineering Conference, Butterworth, Guildford, England, 1988, s. 148-151
65. Jacob S., Kasthuriengan S., Karunanithi R., Manjunatah, *Measurement of interlayer gas pressure in multilayer insulation*, Proceedings of the Twelfth International Cryogenic Engineering Conference, Butterworth, Guildford, England, 1988, s. 152-155
66. Jenninger B., Peón-Hernández G., Szeless B., *Characterisation of net type thermal insulators at 1.8 K low boundary temperature*, Cryogenics, Vol. 38, Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 1998, s.25 - 31
67. Jones M.C, *Use of superconductors in thermal insulation*, Cryogenics, Vol. 13, Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 1976, s. 83-84
68. Keller C.W, Cunnington G.R., Glassford A.P., *Thermal performance of multilayer insulation – final report*, NASA CR 134477, 1974 r.
69. Krishnaprakas C. K., Badari Narayana K., Pradip Dutta , *Heat transfer correlations for multilayer insulation systems*, Cryogenics, Vol. 40, Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 2000, s. 431-435
70. Kumar A.S. , Murthy M.V. K., Jacob, Kasthuriengan S., *Thermal performance of multilayer insulation down to 4.2 K*, Advances in Cryogenic Engineering Materials: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference Vol. 46, Kluwer Academic, Plenum Publishers, 2000, s. 569 - 577
71. Kutzner K., Schmidt F., Wietzke I., *Radiative and conductive heat transfer through superinsulation – experimental results for aluminium coated plastic foils*, Cryogenics, Vol. 13, Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 1973, s.396 - 404
72. Kupiszewski T., *A circuit theory approach to quantifying thermal performance of cryostat designs for SSC dipole magnets*, Supercollider 4, Plenum Press, New York, 1992, s. 993 – 1000

73. Lebrun Ph., Mazzone L., Sergo V., Vullierme B, *Investigation and qualification of thermal insulation systems between 80 and 4.2 K*, Cryogenics, Vol. 32, Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 1992, s. 44-47
74. Lebrun Ph., Szeless B., Tavian L., Williams L.R., *Experimental investigation of accidental loss of insulation vacuum in a LHC prototype dipole cryostat*, Advance in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, Vol. 41, Plenum Press, New York, 1996, s. 799-804
75. Lehmann W., Zahn G., *Safety aspects for the LHe cryostats and LHe transport containers*, Seventh International Cryogenic Engineering Conference, IPC Business Press, 1978, 569 - 579
76. Leung E.M.W, Fast R.W., Hart H. L., Heim J.R., *Techniques for reducing radiation heat transfer between 77 and 4.2 K*, Advances in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference Vol. 25, Plenum Press, New York, 1980, s. 489-499
77. Lin, J. T., *Analysis of gas flow through a multilayer insulation system*, AIAA Journal, Vol. 11, No. 7, July 1973, s. 995-1000
78. Maiti C.R., *A simple model of heat transfer processes in low temperature multilayer insulations*, Indian Journal of Pure and Applied Physics, Vol. 19, 1981, s.571 - 573
79. Mazzone L., Ratcliffe G., Rieubland J.M., Vandoni G., *Measurements of multi-layer insulation at high boundary temperature, using a simple non-calorimetric method*, Proceedings of the Nineteenth International Cryogenic Engineering Conference, Narosa Publishing House, 2002, s. 847-850
80. McIntosh G.E., *Layer by layer MLI calculation using separated mode equation*, Advances in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, Vol.39, Kulwer Academic, Plenum Press, New York 1994, s. 1683 - 1687
81. Mikhalchenko R.S., Getmanets V.F. Pershin N.P., Batozskii , *Theoretical and experimental investigation of radiative-conductive heat transfer in multilayer insulation*, Cryogenics, Vol. 25, Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 1995, s.275 - 278
82. Mikhalchenko R.S., Pershin N.P., Siedorenko I.G., *Heat and mass transfer in multilayer insulation*, Sixth International Cryogenic Engineering Conference Proceeding, PC Science and Technology Press, Guildford, 1976, s. 298 – 302
83. Nast T.C., Spradley I.E., Frank D.J., *Investigation of multilayer insulations at low boundary temperatures*, Proceedings of the Twelfth International Cryogenic Engineering Conference, Butterworth, Guildford, England, 1988, s. 238 – 244
84. Neumann H., *Concept for thermal insulation arrangement within a flexible cryostat for HTS power cables*, Cryogenics 44, Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 2004, s. 93 – 99.
85. Ohmori T., *Thermal performance of multilayer insulation around a horizontal cylinder*, Cryogenics, Vol. 45, Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 2006, s. 725-732.
86. Ohmori T., Boroski W.N., Gonczy J.D., Niemann R.C., Ruschman, Taira T., Takahashi K., Yamamoto A., Hirabayashi H., *Thermal performance of candidate SSC magnet thermal insulation systems*, Advance in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, Vol. 33, Kulwer Academic, Plenum Publisher, 1988, s. 323-331

87. Ohmori T., Nakajima M, Yamamoto A., *Contact heat transfer between adjacent layers in super insulation*, Proceedings of the Nineteenth International Cryogenic Engineering Conference, Narosa Publishing House, 2002, s. 851 – 855
88. Ohmori T., Nakajima M, Yamamoto A., *Thermal performance of multilayer insulation fabricated around a horizontally supported cylinder*, Advances in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, Vol. 49, Melville, New York, 2004, s. 595-604
89. Ohmori T., Nakajima M, Yamamoto A, Takahashi, K., *Lightweight multilayer insulation to reduce the self-compression of insulation films*, Advances in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, Vol. 47, Melville, New York, 2002, s. 1565-1572
90. Ohmori T., Tsuchiya M., Taira T., Takahashi M., *Multilayer insulation with aluminized dimpled polyester film*, Proceedings of the Eleventh International Cryogenic Engineering Conference, Butterworth, Guildford, Surrey, 1986, s. 567 – 571
91. Ohmori T., Yamamoto A, Nakajima M, *The effect of non-zero thermal radiation transmissivity of the aluminized Mylar film on the thermal performance of super-insulation*, Advances in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, Vol. 47, Melville, New York, 2002, s. 1573-1584
92. Poliński J., Chorowski M., *Kriogeniczne izolacje próżniowe w modelowaniu i praktyce cz.1, 2*, Chłodnictwo & Klimatyzacja nr 5(75) maj 2004, s. 66-71, 6(76) czerwiec 2004, s. 26-32
93. Rafałowicz J., *Przewodnictwo cieplne samopompującej izolacji wielowarstwowej*, Chłodnictwo, tom XXVII, nr 4, Sigma-Not, Warszawa, 1992, s. 21 -27
94. Riddone G., CERN Genewa, Szwajcaria – informacja własna
95. Schauer F., Hubmann, M., Pirklbauer, H., Kropatsch G., *Prototype of a semiflexible multilayer insulated enclosure for cryogenic cables and pipelines*, Advance in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, Vol. 33, Kulwer Academic, Plenum Publisher, 1988, s. 352 - 360
96. Scurlock R.G., Saull B., *Development of multi-layer insulation with thermal conductivities below 0.1 $\mu\text{W}/\text{cmK}$* , Proceedings of the Sixth International Cryogenic Engineering Conference, IPC Science and Technology Press, Guildford, 1976, s.249 – 251
97. Shu, Q. S., Fast, R. W., Hart, H. L., *Crack covering patch technique to reduce the heat flux from 77K to 4.2K through multilayer insulation*, Advance in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, Vol. 33, Kulwer Academic, 1990, s. 299-304
98. Shu, Q. S., Fast, R. W., Hart, H. L., *Heat flux from 277 to 77K through a few layers of multilayer insulation*, Cryogenics, Vol. 26, Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 1986, s. 671-677.
99. Shu, Q. S., Fast, R. W., Hart, H. L., *Systematic study to reduce the effects of cracks in multilayer insulation, part 1: Theoretical model*, Cryogenics, Vol. 27, . Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 1987, s. 249-256
100. Shu, Q. S., Fast, R. W., Hart, H. L., *Systematic study to reduce the effects of cracks in multilayer insulation, part 2: Experimental results*, Cryogenics, Vol. 27, Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 1987, s. 298-311.

101. Shu, Q. S., Fast, R. W., Hart, H. L., *An experimental study of heat transfer in multilayer insulation systems from room temperature to 77 K*, Advances in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, Vol. 31, 1986, s. 455-463
102. Shu, Q. S., Fast, R. W., Hart, H. L., *Theory and technique for reducing the effects of cracks in multilayer insulation from room temperature to 77 K*, Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 33, Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 1988, s. 291-298
103. Spradley I.E., Nast T.C., Frank D.J., *Experimental studies of MLI systems at very low boundary temperatures*, Advance in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, Vol. 35, Kulwer Academic, Plenum Publisher, 1992, s. 477 – 485
104. Strobridge T.R., *Cryogenics refrigerators – an updated survey*, NBS Technical Note 655, U.S. Government Printing Office, Washington, 1974
105. Testard O.A., Locatelli M., *Cryostat for SQUID magnetometer*, Cryogenics, Vol. 23, Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 1983, s. 299-302.
106. Tien C.L., Cunnington G.R., *Cryogenic insulation heat transfer*, Advances in Heat Transfer, Vol.9, Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 1976, s. 349-419.
107. Todd R.J., Pate D., Welch K.M., *Outgassing rate of Reemay spunbonded polyester and Dupont double aluminized Mylar*, Report AD/RHIC/RD-44, Brookhaven National Laboratory, 1992
108. Van Sciver S.W., *Helium Cryogenics*, Plenum Press, New York and London, 1986
109. Vandoni G., CERN Genewa, Szwajcaria – informacja własna
110. Weisend II J.G. *Handbook of cryogenic engineering*, Taylor & Francis, USA, 1998
111. Wiseman M., Bundy R., Kelley J.P., Schenider W., *CEBAF cryounit loss of vacuum experiment*, Application of Cryogenic Technology, Vol. 10, 1991, s. 287-303
112. Wiśniewski S. Wiśniewski T. S., *Wymiana ciepła – wydanie piąte*, WNT, Warszawa 2000 r.
113. Yang H. S., Kim D. L., Lee B.S., Hwang S.D., *Experimental investigation of multilayer insulation by using boil-off calorimetry*, Advances in Cryogenic Engineering: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference, Vol. 51, Melville, New York, 2006 s.189 - 194
114. York G.M., *Comparison of the thermal performance of multilayer insulation materials and fabrication techniques*, Proceedings of the Twelfth International Cryogenic Engineering Conference, Butterworth, Guildford, England, 1988, s. 68 – 73
115. Yucel K. T., Basyigit C., Ozel C., *Thermal insulation properties of expanded polystyrene as construction and insulating materials*, Proceedings of the Sixth International Cryogenic Engineering Conference, IPC Science and Technology Press, Guildford, 1976, s 124 - 129
116. Zhitomirskij I.S, Kislov A.M., Romanenko V.G., *A theoretical model of the heat transfer processes in multilayer insulation*, Cryogenics, Vol. 19, Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 1979, s. 265-268
117. Zoller A. F., *High Tc superconductors as thermal radiation shields*, Cryogenics, Vol. 30, Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 1979, s. 545-546
118. www.a1-electronics.net

- 119. www.lydallthermal.com
- 120. www.miwo.pl
- 121. www.mse.ufl.edu
- 122. www.muratorplus.pl
- 123. www.nasa.gov
- 124. www.rockwool.pl
- 125. www.yuda.net.cn
- 126. www.zebiec.com.pl

Załącznik A – Zestawienie literaturowych danych pomiarowych strumienia ciepła przenikającego przez wielowarstwową izolację próżniową w zależności od jej parametrów

Tabela A-1 Zakres temperatur 300 – 77.3 K.

Autor	Opis izolacji ekran/przekładka	Ilość warstw	Ciśnienie Pa	Upakowanie warstw N/cm	Strumień ciepła W/m ²	Wsp. przewodności cieplnej - λ μW/mK	Nr
Kumar, Murthy, Jacob, Kasthuriengan	Stal nierdzewna - Cu		3.5E-4	-	43.00		1
	Stal nierdzewna - taśma Al.		3.5E-4	-	12.50		2
		1			4.50	10.10	3
		2			3.80	17.00	
	Lydall CRS - Folia aluminiowa 0.7μm / włókno szklane	10	3.5E-4	bd	2.00	44.80	
		20			1.20	53.80	
		30			1.10	74.00	
		40			1.10	98.70	
		50			1.00	112.00	
	Jehier IR 305 - DAM 6μm, 400Å, perforacja 0.1% /siateczka nylonowa 2x3 mmxmm	1	3.5E-4	bd	8.00	17.90	4
		2			7.00	31.40	
		10			2.00	44.80	
		20			1.10	49.30	
		30			0.80	53.80	
		40			0.75	67.30	
		50			0.70	78.50	
	NRC2, 300Å - Pognieciony SAM 6μm	1	3.5E-4	bd	9.20	20.60	5
		2			8.50	38.10	
		10			5.00	112.00	
		20			3.70	166.00	
		30			3.40	229.00	
		40			3.20	287.00	
		50			3.00	336.00	
	IHI - Wytłaczany DAM 12 μm	1	3.5E-4	bd	7.10	15.90	6
		2			6.20	27.80	
		10			2.00	44.80	
		20			1.15	51.60	
		30			1.05	70.60	
40		1.00			89.70		
Jacob, Kasthuriengan	DAM 12 μm, perforacja 0.4%/siteczka nylonowa 80 μm		6.6E-03		0.88	123.00	7
		78	9.3E-03	25	0.95	133.00	
			1.3E-01		3.25	455.00	
			6.6E-03		1.01	87.00	
		48	2.0E-02	25	1.25	108.00	
			1.3E-01		1.81	156.00	
			6.6E-03		1.35	94.40	
		39	9.3E-03	25	1.85	129.00	
			8.6E-02		4.39	307.00	
		30	6.6E-03	25	1.92	103.00	
			4.7E-02		3.38	182.00	
		18	6.6E-03	25	3.36	108.00	
			9.3E-03		3.47	112.00	

			7.3E-02		6.40	207.00	
	Stal nierdzewna - Cu		1.3E-03		28		8
			6.6E-03		28		
			1.3E-02		30		
			6.6E-02		36		
			1.3E-01		43		
			4.0E-01	-	60		
			1.1E+00		80		
			1.3E+00		90		
			4.5E+00		98		
			6.9E+00		100		
			1.3E+01		100		
Bapat, Narayankhedkar		20			7.37	104.00	9.1
		40	< 4.0E-3	63.28	4.30	122.00	
		80			2.46	139.00	
		100			2.21	157.00	
		20			4.18	74.90	9.2
		40	< 4.0E-3	50	2.21	79.30	
		60			1.60	85.90	
	DAM 12µm/ włókno szklane76.2 µm	80			1.23	88.10	
		20			1.96	58.70	9.3
		40	< 4.0E-3	30	1.17	69.80	
		60			0.86	77.10	
		80			0.74	88.10	
		20			1.60	59.20	9.4
		40	< 4.0E-3	24.2	1.04	77.40	
		60			0.74	81.90	
Shu, Fast, Hart	Stal nierdzewna – Cu	0	8.0E-04	0	13.90		10
	Stal nierdzewna – taśma Al.	0	8.0E-04	0	4.80		11
			8.0E-04		1.40	15.70	12
		5	2.7E-03	bd	1.50		
			1.1E-02		3.50		
			5.3E-01		42.00		
			8.0E-04		0.87	19.50	
		10	2.7E-03	bd	0.90		
			2.0E-02		3.50		
	NRC2		5.3E-01		17.00		
			8.0E-04		0.70	31.40	
		20	2.7E-03	bd	0.75		
			2.0E-02		2.20		
			5.3E-01		12.00		
			8.0E-04		0.59	39.70	
		30	2.7E-03	bd	0.65		
			1.7E-02		1.20		
			5.3E-01		3.50		
Fesmire,., Augustynowicz, Darve	Jehier IR 305 – DAM 6µm, 400 Å, perforacja 0.1%/siateczka nylonowa 2x3 mmxmm	30	1.5E-03	43	0.90	28.30	13
			2.0E-03		1.00		
			1.5E-02		1.00		
			2.0E-02		1.05		
			1.5E-01		1.80		
			7.6E-01		4.30		
			1.5E+00		8.00		
			1.2E+01		56.00		

	1.2E+02	100.00
	7.6E+02	120.00

Tabela A-2 Zakres temperatur 77.3 – 4.2 K.

Autor	Opis izolacji ekran/przekładka	Ilość warstw	Ciśnienie Pa	Upakowanie warstw warstw/cm	Strumień ciepła mW/m ²	Nr
Kumar,	Stal nierdzewna - Cu		2.0E-05		120	1
Murthy, Jacob,	Stal nierdzewna - taśma Al.		2.0E-05		44	2
Kasthuriengan		1			62	3
		2			48	
	Lydall CRS - Folia	10			71	
	aluminiowa 0.7µm /	20	2.0E-05	bd	60	
	włókno szklane	30			50	
		40			60	
		50			55	
		1			70	4
		2			55	
	Jehier IR 305 - DAM 6 µm,	10			45	
	400Å, perforacja 0.1%	20	2.0E-05	bd	35	
	/siateczka nylonowa 2x3	30			32	
	mmxmm	40			30	
		50			35	
		1			85	5
		2			63	
	NRC2, 300Å - Pognieciony	10			50	
	SAM 6 µm	20	2.0E-05	bd	40	
		30			40	
		40			40	
		50			40	
		1			125	6
		2			100	
	IHI - Wytłaczany DAM	10			50	
	12 µm	20	2.0E-05	bd	40	
		30			35	
		40			40	
Lebrun Ph.,			5.5E-05		38	14
Mazzone L.,			4.6E-04		50	
Sergo V.,			1.3E-03		120	
Vullierme B			3.2E-03		290	
	Pojedyncza warstwa DAM	1	4.3E-03	bd	360	
	25 µm, 250A		1.1E-02		870	
			1.7E-02		1300	
			3.2E-02		2700	
			4.3E-02		3000	
			5.5E-02		3800	
	DAM 25 µm,	10	5.5E-05	bd	50	15
	250A/siateczka 30 µm,		4.6E-04		80	
	4x5 mmxmm		1.3E-03		100	
			3.2E-03		130	
			4.3E-03		160	
			1.1E-02		300	

		1.7E-02		400	
		3.2E-02		750	
		4.3E-02		950	
		5.5E-02		1100	
		5.5E-05		80	
		4.6E-04		90	
		1.3E-03		100	
		3.2E-03		125	
		4.3E-03	bd	150	
		1.1E-02		220	
		1.7E-02		300	
		3.2E-02		520	
		4.3E-02		630	
		5.5E-02		800	
		5.5E-05		36	16
		4.6E-04		46	
		1.3E-03		90	
		3.2E-03		120	
		4.3E-03	bd	150	
		1.1E-02		220	
		1.7E-02		510	
		3.2E-02		630	
		4.3E-02		840	
		5.5E-02		1100	
		5.5E-05		32	
		4.6E-04		41	
		1.3E-03		70	
		3.2E-03		82	
		4.3E-03	bd	98	
		1.1E-02		150	
		1.7E-02		300	
		3.2E-02		400	
		4.3E-02		520	
		5.5E-02		630	
		5.5E-05		40	
		4.6E-04		50	
		1.3E-03		90	
		3.2E-03		100	
		4.3E-03	bd	120	
		1.1E-02		160	
		1.7E-02		300	
		3.2E-02		360	
		4.3E-02		460	
		5.5E-02		520	
Benda V.,	DAM 8mm,	1.0E-05		32	17
Lebrun Ph.,	230A/CRYOTHERM 2330	2.7E-04		42	
Mazzone L.,	60 μm	1.3E-03		51	
Sergo V.,		3.0E-03		67	
Vullierme B		7.0E-03	60	120	
		1.3E-02		210	
		3.0E-02		330	
		4.2E-02		530	
		6.0E-02		680	
		30	2.0E-05	60	32

DAM 8 μm, 230A/SYNTRA 5507 90 μm	10	50	4.0E-04	39	18		
			1.1E-03	41			
			3.2E-03	53			
			4.3E-03	60			
			8.0E-03	72			
			2.1E-02	140			
			3.2E-02	190			
			4.5E-02	250			
			5.2E-02	320			
			9.3E-02	760			
	30	50	2.5E-05	54			
			3.1E-04	58			
			8.4E-04	72			
			2.3E-03	92			
			6.0E-03	140			
			1.4E-02	240			
			2.1E-02	280			
			3.5E-02	480			
			4.8E-02	660			
			5.2E-02	700			
			30	50		1.0E-05	67
						3.0E-04	73
1.4E-03	90						
5.0E-03	120						
1.2E-02	180						
2.5E-02	300						
4.5E-02	420						
7.0E-02	700						
10	45	1.0E-05			61		
		6.0E-04			78		
		4.2E-03	130				
		1.2E-02	240				
		3.8E-02	470				
		6.0E-02	710				
		30	45	1.0E-05	105		
				5.0E-04	110		
				5.0E-03	160		
				1.3E-02	240		
3.2E-02	260						
5.0E-02	480						
8.1E-02	680						

Załącznik B – porównanie izolacji termicznych stosowanych w kriogenice.

W celu porównania właściwości poszczególnych izolacji termicznych stosowanych w technice kriogenicznej dobrze się posłużyć następującym rozważaniem:

Zgodnie z równaniem (1.1) stosunek ciepła dopływającego z otoczenia do obszaru niskotemperaturowego i pracy potrzebnej na usunięcie tego ciepła z powrotem do otoczenia można wyrazić następująco:

$$W = \dot{Q}_0 \frac{T_1 - T_2}{T_2}$$

Natomiast, zgodnie z (2.2) strumień ciepła przenikający przez izolację termiczną z otoczenia o temperaturze T_1 do obszaru niskotemperaturowego o temperaturze T_2 wynosi:

$$\dot{Q}_0 = k \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \quad (\text{B.1})$$

gdzie przewodność cieplną izolacji k , w przypadku pianek izolacyjnych oraz izolacji wypełnionych gazem, można wyznaczyć z poniższego równania:

$$k = \frac{\lambda}{g} \quad (\text{B.2})$$

a dla izolacji próżniowych:

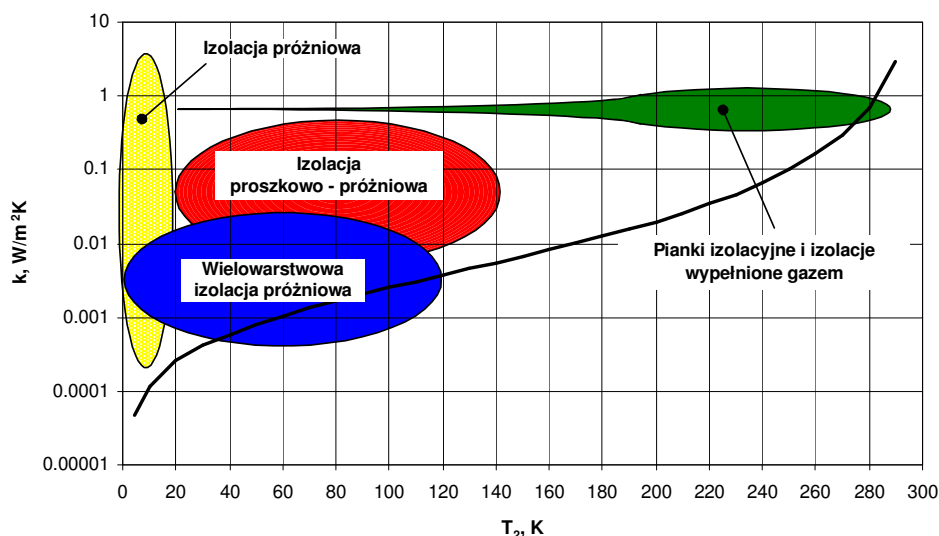
$$k = \frac{\dot{Q}_0}{A \cdot (T_1 - T_2)} \quad (\text{B.3})$$

Podstawiając zależność (B.1) do (1.1) otrzymujemy:

$$k = \frac{\dot{W}}{A} \frac{T_2}{(T_1 - T_2)^2} \quad (\text{B.4})$$

Z praktyki projektowania urządzeń chłodniczych wynika, że moc $\dot{W}$ wykorzystywana na kompensację dopływów ciepła przez izolację oraz przypadająca na jeden metr kwadratowy zaizolowanej powierzchni w zasadzie słabo zależy od poziomu temperatury zimnej i jest rzędu $\dot{W} / A = 1 \text{ W/m}^2$. Podstawiając taką wartość do równania (B.4) można określić pożądaną przewodność cieplną izolacji, którą zastosuje się do izolacji obszarów o temperaturze należącej do zakresów kriogenicznych. Pożądane wartości przewodności cieplnej izolacji k w zależności od poziomu temperatury kriostatowania T_2 przedstawiono na Rysunku B.1 za pomocą czarnej linii. Na rysunku tym przedstawiono również zakresy liczbowe przewodności cieplnej typowych izolacji stosowanych w chłodnictwie i kriotechnice oraz zakresy temperatur stosowania tych izolacji. Przewodność cieplną poszczególnych rodzajów izolacji wyznaczono odpowiednio z wyrażenia (B.2) lub z (B.3) – w przypadku pianek izolacyjnych,

izolacji wypełnionych gazem oraz izolacji proszkowo - próżniowej przyjęto, że grubość izolacji $g=5$ cm.



Rysunek B.1. Pożądana wartość przewodności cieplnej k izolacji w zależności od poziomu temperatury kriostatowania T_2 , przy założeniu, że $\dot{W} / A = 1 \text{ W/m}^2$ oraz orientacyjne zakresy temperatur stosowania poszczególnych rodzajów izolacji.

Jak widać wartości przewodnictwa cieplnego pianek izolacyjnych oraz izolacji wypełnionych gazem odpowiadają pożądanym wartościom jedynie w zakresie temperatur chłodniczych podczas gdy dla temperatur kriogenicznych przewodność cieplna takich izolacji jest o ok. trzy rzędy wartości większa niż wartości pożądanego. Oznacza to, że stosowania takiego rodzaju izolacji dla temperatur kriogenicznych wiąże się z koniecznością poniesienia dużych nakładów pracy związanych kompensacją dopływów ciepła do obszarów izolowanych. Z tych względów pianki izolacyjne oraz izolacje wypełnione gazem stosowane są w technice kriogenicznej niezwykle rzadko. W sporadycznie spotykanych przypadkach izolacje te stosuje się przy krótkotrwałym przechowywaniu (izolacja zbiorników) lub transporcie (izolacje linii transferowych) większości skroplonych gazów (poza skroplonym helum).

Najmniejsze wartości przewodności cieplnej izolacji proszkowo – próżniowych przedstawionych na Rysunku B.1 odpowiadają sytuacji dobrych warunków próżniowych panujących w przestrzeni próżniowych. Wartości te również nie pokrywają się z pożądaną wartością przewodności cieplnej, jednak różnice te, szczególnie przy wyższych temperaturach kriostatowania, są niewielkie. Dodatkowo, izolacje proszkowo – próżniowe charakteryzują się pewną zdolnością nośną, dzięki czemu izolowane elementy instalacji i urządzeń kriogenicznych nie wymagają stosowania dodatkowych wsporników mechanicznych, powodujących często dość znaczne dopływy ciepła do izolowanych obszarów. Z tych względów tego typu izolacje najczęściej stosowane są do izolowania dużych zbiorników i instalacji transportu skroplonych gazów o stosunkowo wysokiej normalnej temperaturze wrzenia (powyżej 77.3 K) i wysokim cieple parowania takich jak: LNG (skroplony metan), argon, powietrze i azot. Rzadziej izolacje proszkowo – próżniowe wykorzystywane są przy izolowaniu urządzeń zawierających skroplony wodór (normalna temperatura wrzenia 20.3 K), ponieważ, jak to wynika z Rysunku B.1, dla takich temperatur kriostatowania użytkowanie takich urządzeń staje się nieekonomiczne. Z podobnych względów obecnie w zasadzie

zaprzeszono stosowania tego typu izolacji w instalacjach zawierających łatwo wrzący skroplony hel (4.2 K).

Skuteczność izolacji próżniowej bardzo silnie zależy od temperatury powierzchni zewnętrznej izolacji oraz od poziomu zastosowanej próżni. Z Rysunku B.1 wynika, iż dla pewnych parametrów pracy izolacja próżniowa charakteryzuje się najmniejszą z pośród technicznie dostępnych izolacji termicznych przewodnością cieplną. Odnosi się to do przypadku zastosowania tego typu izolacji przy izolowaniu skroplonego helu z wykorzystaniem ekranów radiacyjnych czynnie chłodzonych skroplonym azotem lub wodorem przy wytworzeniu bardzo wysokiego poziomu próżni. Natomiast stosowanie izolacji próżniowej do izolowania niskich temperatur bezpośrednio od temperatur otoczenia związane jest z dużymi dopływami ciepła do obszarów izolowanych. Konieczność wytwarzania wysokiego poziomu próżni oraz niedopuszczenie do jej degradacji wymaga dużego nakładu pracy pomp próżniowych, wysokich kosztów wstępnego przygotowania powierzchni mających kontakt z próżnią jak również szczególnej dbałości o eliminację przecieków oraz dyfuzji gazu z otoczenia do przestrzeni próżniowej. Dodatkowo izolacja próżniowa bardzo słabo zachowuje się w sytuacjach awaryjnych polegających na nagłej utracie próżni wyniku uszkodzenia mechanicznego płaszczy próżniowych lub izolowanych naczyń z cieczami kriogenicznymi – patrz Rysunek 4.9. Z wymienionych względów izolację próżniową stosuje się jedynie w niewielkich helowych urządzeniach i instalacjach laboratoryjnych oraz w miejscach, w których zastosowanie innego rodzaju wysokoefektywnej izolacji termicznej ograniczone jest niewielką przestrzenią próżniową.

W zasadzie dla całego zakresu temperatur kriostatowania oraz dla typowych warunków pracy wysokoefektywnych kriogenicznych izolacji termicznych największą skutecznością (najniższą przewodnością cieplną) charakteryzuje się wielowarstwowa izolacja próżniowa. Nawet w układach z czynnie chłodzonymi ekranami radiacyjnymi skuteczność użycia tego typu izolacji jedynie w nieznacznym stopniu odbiega od najlepszego rozwiązania, jakim jest prawidłowo działająca izolacja próżniowa. Z tego względu ten typ izolacji często określany jest mianem superizolacji. Obecnie wielowarstwowa izolacja próżniowa jest najpowszechniej stosowanym typem kriogenicznej izolacji termicznej. Na taki stan rzeczy, obok doskonałej efektywności, mają wpływ również inne jej zalety: małe ciepło właściwe, mały ciężar właściwy, stosunkowo mała czułość na degradację próżni oraz stosunkowo dobre właściwości izolacyjne w przypadku nagłej utraty próżni. Dodatkowo, coraz to szersze stosowanie superizolacji i tendencje na zastępowanie superizolacją izolacji proszkowo – próżniowych w ich dotychczasowych obszarach zastosowania jest wynikiem wciąż malejących kosztów wytwarzania materiałów, z których wykonuje się wielowarstwową izolację próżniową, oraz braku wpływu wibracji cieplnych i mechanicznych na właściwości superizolacji. W porównaniu z izolacjami proszkowo – próżniowymi niewątpliwą wadą superizolacji jest konieczność stosowania dodatkowych podpór mechanicznych do podtrzymywania niskotemperaturowych elementów urządzeń i instalacji kriogenicznych. Eliminacją tej wady może okazać się możliwość zastąpienia podpór mechanicznych podporami magnetycznymi [44]. Jednak takie rozwiązania znajdują się dopiero we wstępnej fazie badań.

O niezwykle dobrych właściwościach wielowarstwowej izolacji próżniowej może świadczyć fakt, iż nakład pracy potrzebny do kompensacji dopływu ciepła przez superizolację do obszarów o temperaturze kriogenicznej jest ekwiwalentny do nakładu pracy w przypadku zastosowania pianek izolacyjnych oraz izolacji wypełnionych gazem przy izolowania obszarów o temperaturze chłodniczej – porównaj Rysunek B.1.

ZESPÓŁ BADAWCZY
mgr inż. Jarosław POLIŃSKI

ODBIORCY:

1. Rada Naukowa Instytutu Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów	4
3. Biblioteka I-20	1
4. Autor	1

suma: 6 szt.

Raport złożono
w Dziale Wydawnictwa I-20
w lipcu 2006