

MODELOWANIE STRAT CIEPŁA WYBRANYCH ELEMENTÓW INSTALACJI PRZEMYSŁOWYCH Z WYKORZYSTANIEM METOD NUMERYCZNYCH

MODELLING OF HEAT LOSSES FOR CHOSEN ELEMENTS OF INDUSTRIAL INSTALATIONS APPLYING NUMERICAL METHODS

ZBIGNIEW PLUTECKI¹,
KRYSTIAN RYSZCZYK¹,
PAWEŁ SATTLER²

POLITECHNIKA OPOLSKA

¹ WYDZIAŁ INŻYNIERII PRODUKCJI I LOGISTYKI

² WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI I INFORMATYKI

STRESZCZENIE

W rozdziale przedstawione zostały przykładowe możliwości stosowania zaawansowanych metod numerycznych do modelowania zjawisk cieplno-przepływowych w celu wyznaczenia strat ciepła wybranych elementów instalacji przemysłowych, które charakteryzują się złożoną konstrukcją i geometrią 3D. Po przeprowadzeniu badań symulacyjnych określono – dla rozpatrywanych przykładów – potencjał redukcji strat ciepła instalacji przemysłowych w wyniku minimalizowania wpływu nieciągłości izolacji oraz mostków termicznych.

ABSTRACT

The paper presents examples of the results of modelling the heat loss selected elements of industrial installations that were performed using numerical methods taking into account the of complex 3D geometry tested objects. Analysis of the results of research indicates possibility and potential for reducing heat loss from industrial installations by minimizing the impact of thermal bridges.

5.1. Wstęp

Podczas projektowania lub wykonywania układów termoizolacyjnych pojawia się problem poprawnej oceny strat ciepła elementów instalacji przemysłowych o nieregularnym kształcie lub tych jej fragmentów, które charakteryzują się nieciągłością lub niejednorodnością warstwy izolacji. Przykładem takich elementów są: zawory odcinające i regulacyjne, urządzenia wykonawcze typu pompy, wentylatory oraz zawieszania, podparcia, konstrukcje pomocnicze, odpowietrzenia itp. W przypadku układów termoizolacyjnych, konieczne jest także stosowanie konstrukcji pomocniczej i podkonstrukcji płaszcza ochronnego, którą najczęściej wykonuje się z profili stalowych. Przyczynia się to do powstawania niejednorodności warstwy izolacyjnej oraz liniowych lub punktowych mostków cieplnych wewnątrz warstwy izolacyjnej [1, 2, 3, 4]. Wyznaczanie strat ciepła – w takich przypadkach metodami analitycznymi – może często prowadzić do uzyskania niepoprawnej wartości.

Alternatywą dla stosowania metod bilansowych opisanych prostymi zależnościami jest wykonywanie obliczeń z wykorzystaniem metod numerycznych. W tym przypadku można wykorzystać modele graficzne badanych obiektów. Najczęściej definiuje się je w przestrzeni 3D – z zachowaniem rzeczywistych wymiarów i najistotniejszych kształtów – dzięki wykorzystaniu programów komputerowych zaliczanych do grupy CAD (*Computer Aided Desig*). Następnie model geometryczny implementuje się w środowisku do modelowania zjawisk fizycznych (w tym przypadku zjawisk cieplno-przepływowych), w którym dobiera się i parametryzuje równania matematyczne modelu oraz sposób ich rozwiązywania z uwzględnieniem warunków brzegowych. Układy równań modelu rozwiązuje się metodami numerycznymi, czyli w sposób przybliżony. Mimo to, uzyskiwane wyniki, przy poprawnie zdefiniowanym modelu, są obciążone stosunkowo małymi błędami.

Poniżej autorzy przedstawiają kilka przykładów wykorzystania metod numerycznego rozwiązywania równań opisujących przepływ ciepła w przestrzeni 3D. Rozpatrzono trzy różne przypadki, dla których

opracowano sześć modeli geometrycznych, a następnie wykonano obliczenia symulacyjne dla kilku zadanych warunków brzegowych.

5.2. Opis rozpatrywanych przykładów

Obiektem badań jest rurociąg pary wodnej przegrzanej o temperaturze 540°C, wykonany z rury stalowej bezszwowej czarnej o średnicy nominalnej 200 mm i grubości ścianki 20 mm. Rurociąg pokryty jest warstwą izolacyjną z wełny mineralnej o grubości 200 mm. Warstwa izolacji zabezpieczona jest płaszczem ochronnym z blachy stalowej ocynkowanej grubości 0,6 mm. Płaszcz ochronny podtrzymuje stalowa podkonstrukcja.

Aby zaprezentować fragmenty rurociągu o złożonej, nieregularnej lub niejednorodnej konstrukcji układu termoizolacyjnego, wybrano trzy charakterystyczne miejsca instalacji. Rysunki 5.1-5.3 ilustrują rozpatrywane przykłady. W tabeli 5.1 przedstawiono natomiast sposób, który przyjęto do ich oznaczania.

Pierwszy przykład przedstawia punkt podparcia rurociągu poziomego na podporze ślizgowej poziomej (rysunek 5.1). Podporę rurociągu stanowi przyspawany do niego ślizg wykonany z blachy stalowej o grubości 15 mm, opartej na belce konstrukcyjnej wykonanej z dwóch ceowników C100, które tworzą profil zamknięty. Celem analizy jest wykazanie różnicy strat ciepła wynikających z zamontowania podkładki teflonowej o grubości 3 mm między stopą ślizgu i belką podpory (P-1.2) a montażem klasycznym bez podkładki (P-1.1).

Drugi przykład ukazuje punkt podparcia rurociągu pionowego na zawieszaniu dwucięgnowym (rysunek 5.2) w dwóch różnych wykonaniach - bez izolacji i z izolacją.

Trzeci przykład prezentuje fragment rurociągu w punkcie wykonania konstrukcji wsporczej izolacji i podkonstrukcji płaszcza ochronnego izolacji (rysunek 5.3). Rozważono tu dwa przypadki montowania podkonstrukcji. Pierwszy polega na bezpośrednim łączeniu pierścieni konstrukcji z płaskownikami umieszczonymi promieniowo, w drugim zaś uwzględniony jest dodatkowy montaż przekładek izolacyjnych między poszczególnymi częściami podkonstrukcji.

Nr przykładu	Oznaczenie	Opis
Przykład 1.1	P-1.1	rurociąg poziomy DN200 z podporą ślizgową bez podkładki
Przykład 1.2	P-1.2	rurociąg poziomy DN200 z podpora ślizgową z podkładką teflonową
Przykład 2.1	P-2.1	rurociąg pionowy DN200 podparty na nieizolowanym zawieszaniu dwucięgnowym
Przykład 2.2	P-2.2	rurociąg pionowy DN200 podparty na izolowanym zawieszaniu dwucięgnowym
Przykład 3.1	P-3.1	fragment rurociągu z podkonstrukcją nośną płaszcza ochronnego izolacji bez podkładek termicznych
Przykład 3.2.	P-3-2	fragment rurociągu DN200 z podkonstrukcją nośną płaszcza ochronnego izolacji z podkładkami termicznymi

Tab. 5.1. Zestawienie rozpatrywanych przykładów badań numerycznych

5.3. Sposób obliczeń, założenia i uproszczenia

Na potrzeby prowadzonej analizy rozpatrywane obiekty zostały opisane w środowisku graficznym AutoCAD firmy Autodesk. W tym programie opracowano modele geometryczne bryłowe w przestrzeni 3D z zachowaniem kształtów i wymiarów odpowiadających obiektom rzeczywistym. Dokonano jedynie drobnych uproszczeń niemających wpływu na charakter prowadzonej analizy.

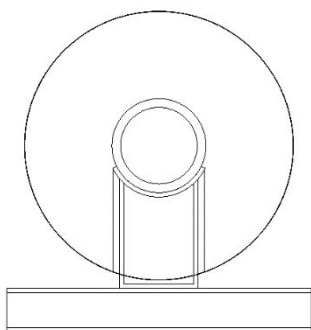
Implementacji modelu, celem wykonywania obliczeń cieplno-przepływowych, można dokonywać w różnych środowiskach informatycznych, między innymi w Ansys, Therm, Eurokobra, Pro Engineer, Catia. Prezentowane poniżej wyniki badań symulacyjnych uzyskano w środowisku SolidWorks przy użyciu platformy Simulation firmy Dassault Systemes. Obliczenia wykonano z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES).

Przeprowadzone badania symulacyjne uwzględniają zjawisko przewodzenia ciepła przez poszczególne materiały budujące układ termoizolacyjny i materiały konstrukcyjne. Ujęto w nich także zjawisko konwekcji wymuszonej występujące przy przekazywaniu ciepła od pary wodnej do ścianki rury oraz zjawisko konwekcji swobodnej pojawiające się podczas przejmowania ciepła od powierzchni zewnętrznej

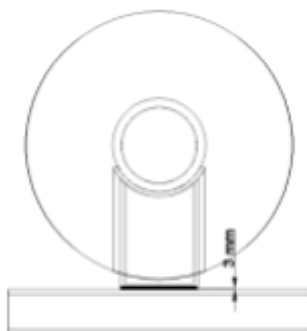
powłaczki izolacji do powietrza otaczającego badany obiekt. Rozpatrzono również warunki ustalonej wymiany ciepła.

Dla wszystkich rozważanych przypadków przyjęto, iż temperatura czynnika przepływającego przez rurociąg wynosi 540°C , temperatura zewnętrzna powietrza -25°C , prędkość przepływu pary -50 m/s , a powietrza zewnętrznego -1 m/s . Powyższe parametry wpływały na wartość obliczeniową współczynnika przyjmowania ciepła, który dla konwekcji wymuszonej osiągnął wysokość $35\text{-}37\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, a dla konwekcji swobodnej $-6\text{-}9\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Współczynniki przewodzenia ciepła dla materiału rurociągu, podpór i zawiesi przyjęte zostały zgodnie z parametrami materiałów wyspecyfikowanych w dokumentacji projektowej rurociągu pary. Współczynnik przewodzenia ciepła dla materiału izolacji termicznej został zaś określony na podstawie dokumentacji technicznej producenta. Przyjęty materiał to wełna mineralna o gęstości $800\text{ kg}/\text{m}^3$, której współczynnik przewodzenia ciepła zależy w dużym stopniu od zmian temperatury. Do obliczeń przyjęto zależność opisującą wpływ temperatury na współczynnik przewodzenia według *Karty katalogowej ProRox WM 960PL PDS 106* [5] wraz z pozostałymi parametrami materiału.

a)

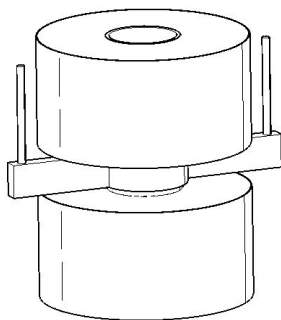


b)

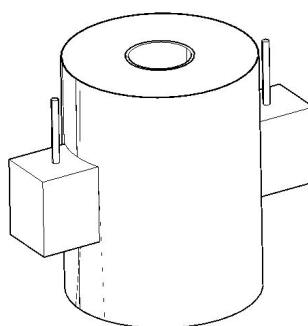


Rys. 5.1. Przykład 1 - model rurociągu poziomego opartego na podporze ślizgowej:
a) bez podkładki **P-1.1**, b) z podkładką teflonową między podporą a ślizgiem **P-1.2**

a)



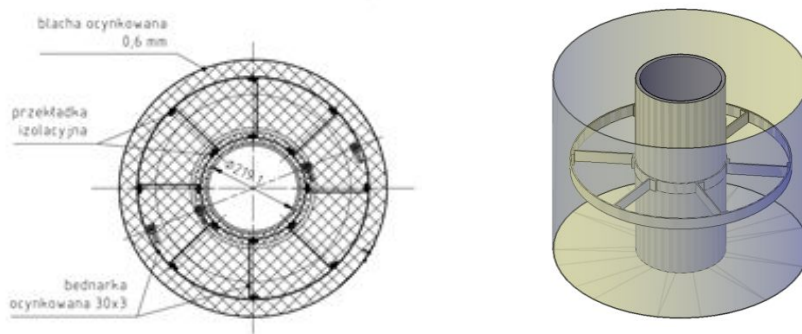
b)



Rys. 5.2. Przykład 2 - model rurociągu pionowego opartego na zawieszonym dwucięgowym: a) podpora nieizolowana **P-2.1**, b) podpora izolowana **P-2.2**

a)

b)

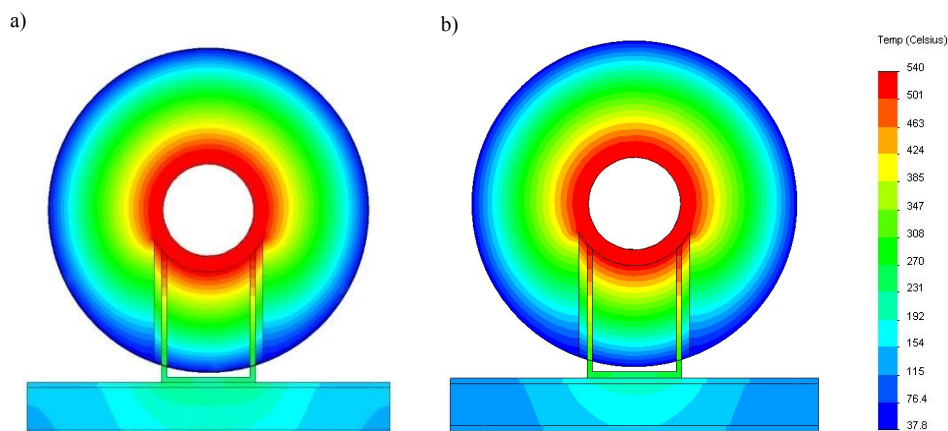


Rys. 5.3. Przykład 3 – model fragmentu rurociągu z podkonstrukcją płaszcza ochronnego izolacji: a) przekrój poprzeczny, b) widok z uwzględnieniem izolacji

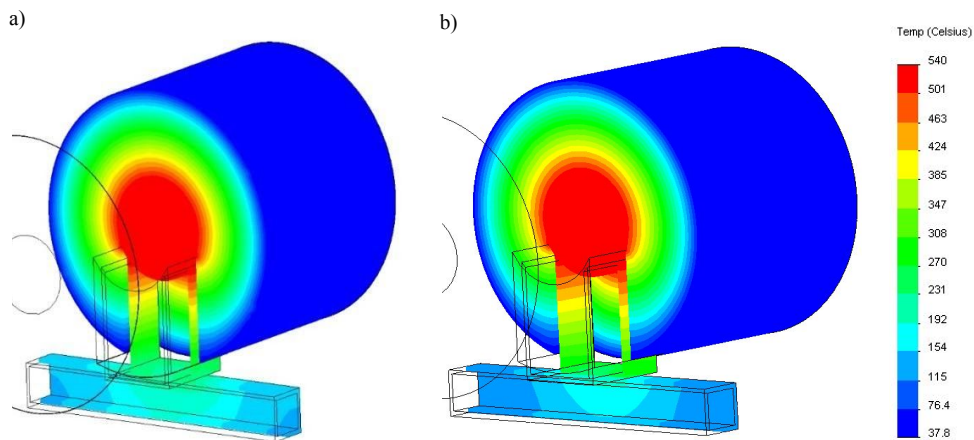
5.4 Wyniki badań symulacyjnych wraz analiza

Wyniki badań symulacyjnych, uzyskanych na drodze obliczeń numerycznych dla rozpatrywanych przykładów, przedstawiono na rysunkach 5.4-5.12. Zaprezentowano je w postaci rozkładów pól temperatury w wybranych przekrojach badanego obiektu lub, po dodatkowym uporządkowaniu, w postaci wykresu uśrednionej wartości temperatury na zadanej powierzchni badanego obiektu.

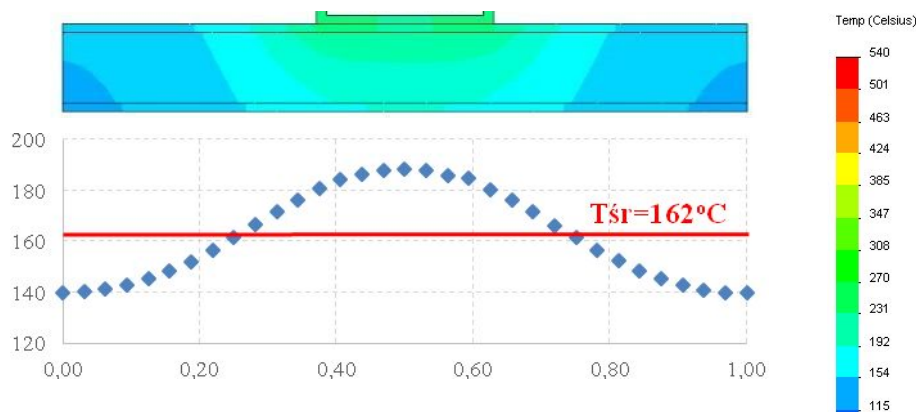
Na rysunkach 5.4 i 5.5 zademonstrowano wyniki dla pierwszego przykładu, przedstawiającego rozkład pól temperatur dla przypadku, kiedy nie zamontowano podkładki teflonowej między ślizgiem a podporą i dla przypadku z zamontowaną podkładką teflonową. Porównanie wyników wskazuje, że po zainstalowaniu podkładki uległa znacznemu obniżeniu średnia temperatura powierzchni podpory (rysunki 5.6 i 5.7). Uśrednione wartości rozkładu temperatur na powierzchni belki podporowej wynoszą odpowiednio 162°C i 141°C. W środkowej części podpór występują temperatury maksymalne, sięgające nawet 190°C w podporze bez zamontowanej podkładki i 165°C z podkładką.



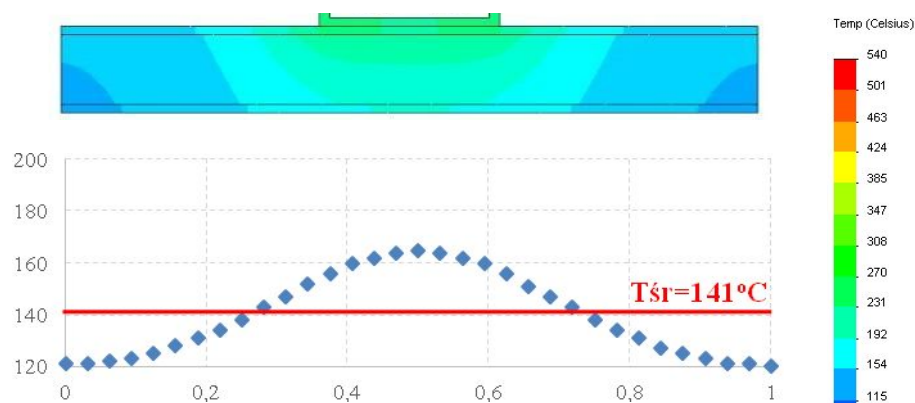
Rys. 5.4. Rozkład temperatury w przekroju poprzecznych badanego przykładu 1: a) montaż bez podkładki P-1.1, b) montaż z podkładką teflonową pod ślizgiem izolacji P-1.2



Rys. 5.5. Widok izometryczny na rozkład temperatury w przekroju poprzecznym badanego przykladu 1: a) montaż bez podkładki P-1.1, b) montaż z podkładką teflonową pod ślizgiem izolacji P-1.2



Rys. 5.6. Rozkład średniej temperatury na długości belki podporowej, przykład P-1.1



Rys. 5.7. Rozkład średniej temperatury na długości belki podporowej, przykład P-1.2

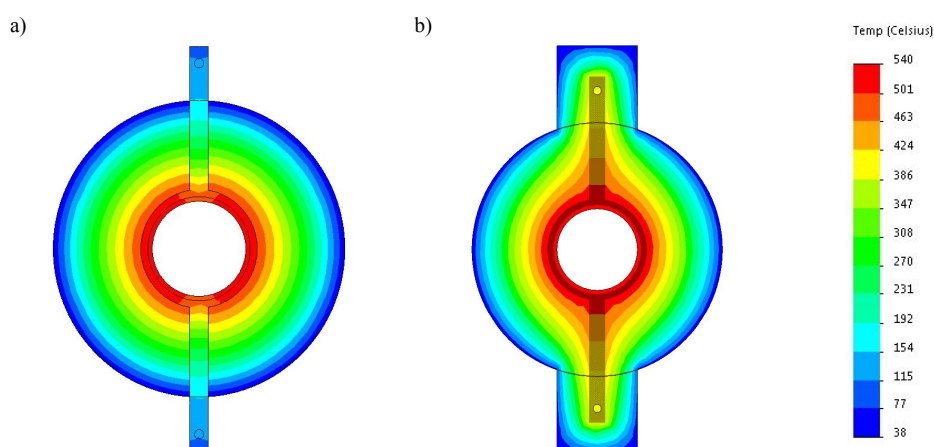
Strumienie ciepła tracone, wynikające z obliczonej temperatury belki podporowej, wynoszą $Q_1 = 448$ W, gdy nie zamontuje się podkładki i $Q_2 = 391$ W, jeśli zainstaluje się podkładkę izolacyjną. Obliczone

wartości strat ciepła wyznaczono przy konwekcji swobodnej, opisaney współczynnikiem przyjmowania ciepła wynoszącym średnio $8,4 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ i przy temperaturze zewnętrznej 25°C .

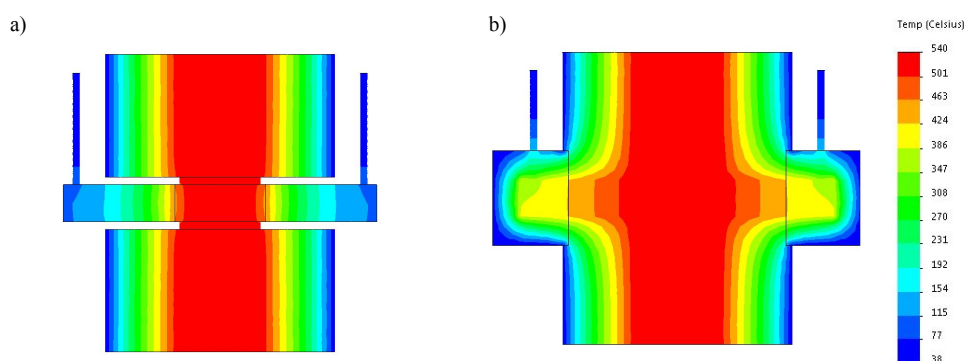
Wykresy zaprezentowane na powyższych rysunkach przedstawiają średnią wartość temperatury belek podpór. Ich wartości różnią się o około 20°C , co przekłada się na ograniczenie strat ciepła przez podpórę o około $\Delta Q = 57 \text{ W}$. Chcąc znacząco obniżyć straty ciepła przez podpórę, należałoby ją całą zaizolować.

Wzrost efektywności energetycznej wynikającej z zaizolowania podpory przedstawiono w przykładzie 2. Rozpatruje się w nim rurociąg pionowy podparty na zawieszniu dwucięgnowym (rysunek 5.2). W omawianym przykładzie pół-obejmy zamocowane są bezpośrednio do rurociągu, co powoduje przerwanie ciągłości izolacji termicznej (rysunek 5.2a). Aby ograniczyć straty ciepła wynikające z przerwania izolacji, można zaizolować rurociąg wraz z podpórą. Taką ewentualność zilustrowano na rysunku 5.2b. W tym przypadku zawieszenie pokryte zostało izolacją z wełny mineralnej o grubości 80 mm z każdej strony.

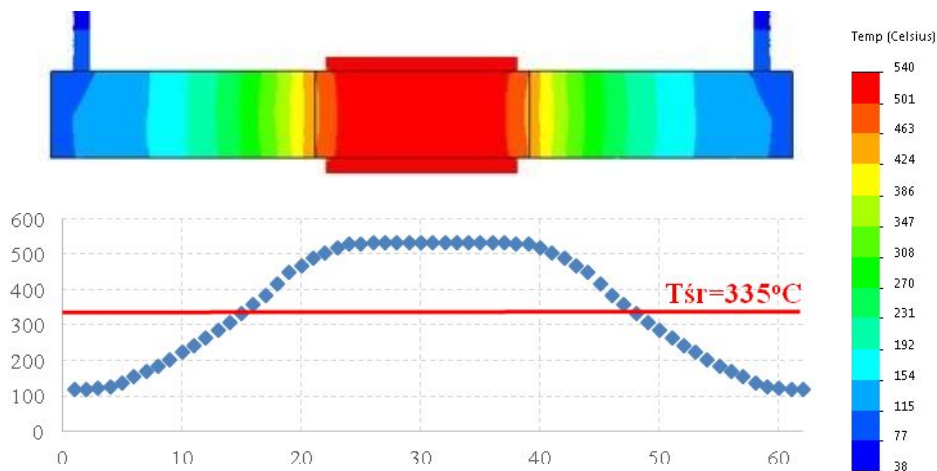
Na rysunkach 5.8-5.11 przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych wraz z ich analizą. Wynika z nich między innymi, iż brak ciągłości izolacji powoduje, że średnia temperatura obejmy wynosi ponad 320°C . Tak wysoka temperatura generuje straty ciepła podpory na poziomie 823 W (rysunek 5.10). Zaizolowanie podpory bardzo znacząco obniża temperaturę na zewnętrznej powierzchni płaszcza izolacji (rysunek 5.9b oraz tabela 5.2). Z obliczeń wynika, że średnia temperatura nie przekroczy wówczas 52°C . Zmniejszeniu ulega również niejednorodność rozkładu temperatury na powierzchni izolacji. Jej wysokość oscyluje między 36°C a 86°C (rysunek 5.11). Najwyższe temperatury występują w pobliżu łączenia podpory z pionowymi cęgnami. Obliczeniowy strumień ciepły tracony w tym przypadku wynosi 136 W .



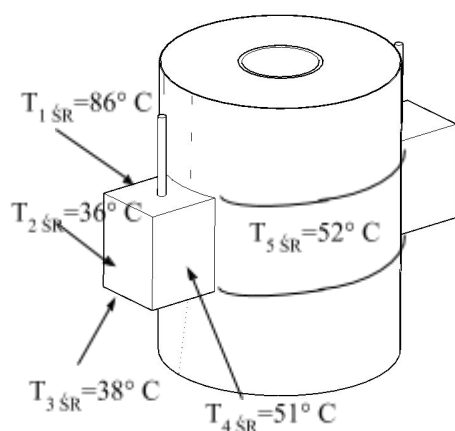
Rys. 5.8. Rozkład temperatury w przekroju poprzecznym przy: a) nieizolowanej podporce P-2.1, b) izolowanej podporce P-2.2



Rys. 5.9. Rozkład temperatury w przekroju podłużnym przy: a) nieizolowanej podporce P-2.1, b) izolowanej podporce P-2.2



Rys. 5.10. Uśredniony rozkład temperatury na długości podpory, P-2.1

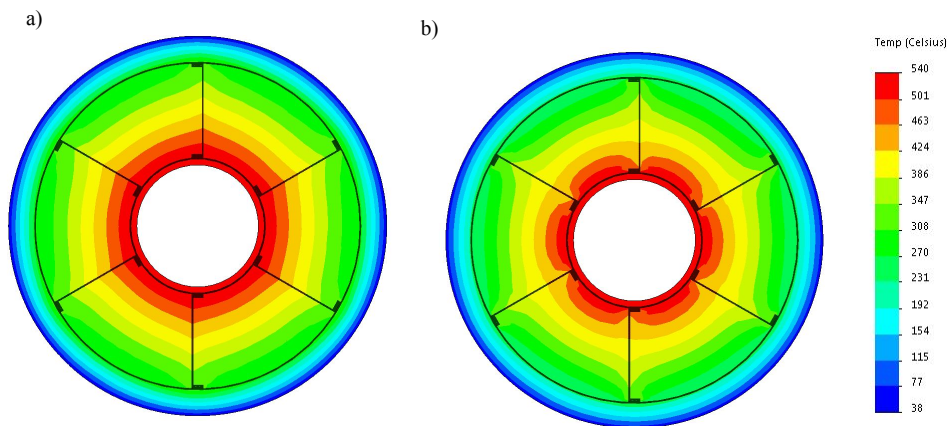


Tab. 5.2. Zestawienie powierzchni zaizolowanej podpory

Ściana	Szt.	Obszar [m ²]	Średnia temperatura ścianki [°C]
1	2	0,08	86
2	2	0,104	36
3	2	0,08	38
4	4	0,212	51
5	2	0,364	52
Średnia temperatura zaizolowanej podpory			51,7

Rys. 5.11. Rozkład średniej temperatury na powierzchni płaszcza izolacji podpory

Kolejnym przykładem wykorzystania metod numerycznych jest badanie wpływu niejednorodności struktury układu termoizolacyjnego spowodowanej wykonaniem podkonstrukcji do montażu płaszcza ochronnego izolacji (rysunek 5.3). Rozpatrzono w nim skutek montażu przekładek izolacyjnych między pierścieniem wewnętrznym podkonstrukcji a płaskownikami dystansowymi. Wybrane wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych przedstawiono na rysunkach 5.12a i 5.12b.



Rys. 5.12. Rozkład temperatury w przekroju poprzecznym układu izolacyjnego: a) bez przekładek izolacyjnych, P-3.1; b) z uwzględnieniem przekładek izolacyjnych P-3.2

W przeciwieństwie do poprzednio prezentowanych przykładów, różnice rozkładów temperatur na powierzchni płaszcza ochronnego izolacji praktycznie nie występują. Zauważalnym efektem zastosowania przekładek izolacyjnych jest niższa temperatura płaskowników dystansowych oraz temperatura wełny mineralnej w pobliżu miejsca montażu płaskowników z pierścieniem. Efekt ten ma minimalny wpływ na zmniejszenie strat ciepła. Oddziałuje jednak korzystnie na dłuższą wytrzymałość mechaniczną elementów podkonstrukcji.

5.5. Podsumowanie

Zaprezentowane wyżej przykłady wykorzystania metod numerycznych dowodzą ich przydatności podczas analizowania strat ciepła elementów instalacji przemysłowych o nieregularnym kształcie lub ich fragmentów charakteryzujących się nieciągłością lub niejednorodnością izolacji. Raz opracowany model umożliwia prowadzenie wielowariantowych analiz cieplno-przepływowych i – na przykład – badanie wpływu zastosowania różnych rodzajów materiałów izolacyjnych (aerożel, włókna ceramiczne, teflon, guma) lub zachowania układu termoizolacyjnego w różnych warunkach pracy instalacji (zmiana temperatur, prędkości itp.).

Dzięki wykonanym badaniom symulacyjnym udało się określić – dla wszystkich rozpatrywanych przykładów – jakościowy i ilościowy wpływ niejednorodności układu termoizolacyjnego na straty ciepła. Wyznaczone tą drogą efekty energetyczne można łatwo przeliczyć na ekonomiczne, a wtedy jest już bardzo łatwo uzasadnić słuszność podjęcia racjonalnej decyzji, co do sposobu izolowania nietypowych elementów instalacji lub całych obiektów.

LITERATURA:

- [1] S. Łopata, M. Gargula, *Badania i numeryczna symulacja warunków pracy zawieszenia rurociągów przemysłowych*, „Czasopismo Techniczne” 2008, z. 5-M, s. 209-218.
- [2] A. Szkarowski, L. Łatkowski, *Ciepłownictwo*, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 2006.
- [3] O. Niemyjski, *Straty ciepła sieci ciepłowniczych i możliwości ich ograniczenia*, „Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja” 2007, nr 7-8.
- [4] J. Górzyński, *Przemysłowe izolacje cieplne*, Wydawnictwo Sorus, Poznań 1996.
- [5] Karta katalogowa ProRox WM 960PL PDS 106, ISSUED: 24-05-2012, Rockwool Polska Sp. z o.o. *Rockwool Technical Insulation*.

