

KATARZYNA ŁAZARCZYK-GŁOWIK\*, EDWARD LISOWSKI\*\*

WYKORZYSTANIE PROGRAMU SOLIDWORKS  
W PROJEKTOWANIU I BADANIACH SYMULACYJNYCH  
MIĘDZYPŁASZCZOWYCH PODPÓR  
ZBIORNIKÓW KRIOGENICZNYCH

USING OF SOLIDWORKS SYSTEM IN DESIGN  
AND SIMULATION RESEARCH OF CRYOGENIC  
TANKS SUPPORTS

Streszczenie

W artykule przedstawiono wykorzystanie systemu SolidWorks Simulation Professional w badaniach symulacyjnych podpór dwupłaszczyznowych zbiorników kriogenicznych przeznaczonych do przechowywania skroplonych gazów, takich jak LNG, Azot i innych o temperaturze skraplania do minus 200°C. Zastosowane oprogramowanie okazało się użytecznym narzędziem, które pozwoliło na integrację projektowania i z modelowaniem przepływu ciepła przez podpory zbiornika.

*Słowa kluczowe: zbiorniki kriogeniczne, modelowanie w SolidWorks Simulation*

Abstract

In this paper utilization of SolidWorks Simulation Professional system in research of cryogenic tanks supports is presented. The tanks are designed for storing liquefied cryogenic gases, as LNG, nitrogen etc., which condensation temperature is about minus 200 Celsius degrees. It appears that applied software is a very useful tool, which allowed to integrate design process with modelling of heat transfer through the tank supports.

*Keywords: zbiorniki kriogeniczne, modelowanie w SolidWorks Simulation*

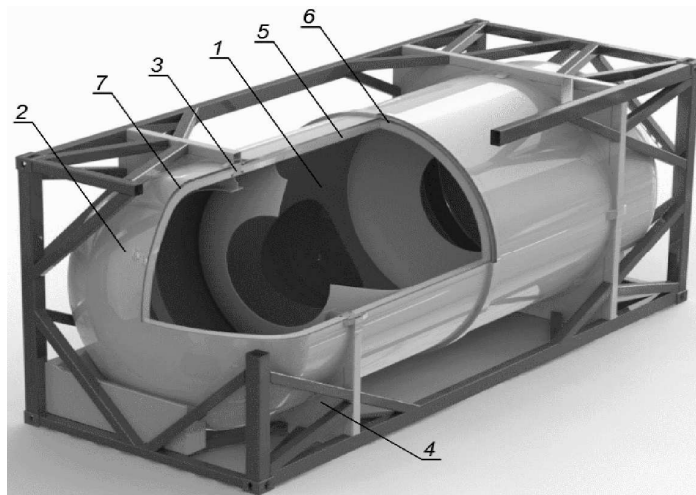
\* Mgr inż. Katarzyna Łazarczyk-Głowik, Zakłady Aparatury Chemicznej „Chemet” S.A., 42-600 Tarnowskie Góry, ul. Sienkiewicza 47.

\*\* Prof. Dr hab. inż. Edward Lisowski, Instytut Informatyki Stosowanej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

## 1. Wstęp

Wykorzystanie gazów w postaci skroplonej w przemyśle stale się zwiększa. Wynika to między innymi z zalety, jaką jest to, że gazy w postaci skroplonej są czystsze chemicznie i w czasie ich magazynowania zajmują znacznie mniejszą objętość niż przechowywane w normalnych warunkach. Tak na przykład skroplony gaz ziemny (LNG) zajmuje objętość ponad 600 razy mniejszą niż w warunkach normalnych. Dzięki temu zbiorniki do jego przechowywania mogą być znacznie mniejsze, jak również możliwe jest jego transportowanie w ten sposób. Dzięki temu można dostarczać gaz bez konieczności budowy kosztownych gazociągów. Wadą tego systemu są zbiorniki, które muszą wykazywać się wysoką efektywnością izolacji cieplnej, by nie następowało podgrzewanie gazu w zbiorniku, co z kolei prowadzi do wzrostu ciśnienia i konieczności opróżniania zbiornika przez zawory bezpieczeństwa. Nowe rodzaje materiałów z wykorzystaniem nano-technologii sprawiły, że możliwe jest uzyskanie wysoce efektywnej izolacji na płaszcze zbiorników pozwalającej na przechowywanie skroplonego LNG przez znaczny okres, na przykład sezon grzewczy [6, 9].

W zakresie temperatury do  $-200^{\circ}\text{C}$  stosuje się zwykle zbiorniki dwupłaszczowe z kombinowaną izolacją składającą się z materiału izolacyjnego, ekranów promieniowania oraz próżni. W przypadku tego typu zbiorników miejscem największych przecieków ciepłych są podpory wewnętrzne oraz przyłącza rurociągów. Dlatego te elementy zbiorników są przedmiotem poszukiwania nowych materiałów i rozwiązań konstrukcyjnych dla obniżenia strat ciepłych.



Rys. 1. Model 3D zbiornika kontenerowego do przewozu LNG: 1 – zbiornik wewnętrzny, 2 – zbiornik zewnętrzny, 3 – podpory wewnętrzne z tworzywa sztucznego, 4 – podpory zewnętrzne, 5 – izolacja, 6 – ekrany, 7 – próżnia

Fig. 1. 3D model of LNG container: 1 – inner tank, 2 – outer tank, 3 – inner supports made of plastic, 4 – outer supports, 5 – insulation, 6 – shields, 7 – vacuum

Z uwagi na integrację modułów projektowania z obliczeniowymi zdecydowano się na wykorzystanie systemu SolidWorks z pakietem symulacyjnym SolidWorks Simulation

Professional. Na rysunku 1 pokazano model kontenera cysterny wykonany w programie SolidWorks, przeznaczonego do transportu drogowego, kolejowego i morskiego. Projekt ten został zrealizowany w Instytucie Informatyki Stosowanej Politechniki Krakowskiej wspólnie z Zakładami Aparatury Chemicznej w Tarnowskich Górach, które to na ten wyrób uzyskały międzynarodowy certyfikat LOYDA [8].

Problemy dotyczące projektowania zbiorników kriogenicznych obejmują wiele zagadnień. W artykule podjęto zagadnienie modelowania podpór (rys. 1 – poz. 3) dla zbiorników kriogenicznych dwupłaszczyznowych przeznaczonych na płyny kriogeniczne schładzane do temperatury  $-200^{\circ}\text{C}$ , a dokładnie  $-196^{\circ}\text{C}$ , co wynika z możliwości testowania zbiorników skroplonym azotem, względnie tanim i dostępnym obecnie skroplonym gazem. Przy konstrukcjach zbiorników dwupłaszczyznowych jak na rys. 1 zachodzi konieczność podparcia zbiornika wewnętrznego – zimnego, tak by nie stykał się on bezpośrednio ze zbiornikiem zewnętrznym o temperaturze zbliżonej do temperatury otoczenia. Podpory te mogą być wykonane jako wsporniki stalowe o małym przekroju poprzecznym lub też z wykorzystaniem materiałów charakteryzujących się małą wartością współczynnika przewodzenia ciepła. Biorąc pod uwagę względnie małe wymiary poprzeczne tych podpór i to, że znajdują się one w otoczeniu wysoce efektywnej izolacji, przepływ ciepła przez nie wynika głównie z zjawiska przewodnictwa cieplnego [6, 7].

## 2. Przepływ ciepła przez podpory wewnętrzne zbiornika

Przewodzenie ciepła występuje pomiędzy elementami o różnych temperaturach. W przypadku zbiornika kriogenicznego różnica temperatur pomiędzy płaszczyznami może wynosić  $200^{\circ}\text{C}$ , a nawet więcej w szczególnych warunkach. Własności cieplne materiałów takich jak stal, ale również dotyczy to tworzyw sztucznych, zmieniają się zwykle wraz ze zmianą temperatury [1, 2, 4, 5, 11, 12]. Dla użytej w konstrukcji zbiornika stali nierdzewnej o oznaczeniu 1.4301 przy zmianie temperatury z  $+20^{\circ}\text{C}$  do  $-220^{\circ}\text{C}$  współczynnik przewodności cieplnej zmniejszył się o ok. 25%. Jest to zjawisko korzystne, chociaż jego wartość pozostaje wysoka.

W ogólnym przypadku przewodzenie ciepła jest opisane prawem Fouriera [6]:

$$q = -\lambda \text{ grad } (T) \quad (1)$$

gdzie:

$q$  – jednostkowy strumień ciepła [ $\text{W}/\text{m}^2$ ],

$\lambda$  – przewodność cieplna [ $\text{W}/(\text{m K})$ ], (pochodna temperatury w kierunku  $n$  – prostopadłym do powierzchni izotermicznej).

Przyjmując, że ciepło przepływa jednokierunkowo, od zbiornika zewnętrznego o wyższej temperaturze do wewnętrznego, równanie (1) można przekształcić do postaci:

$$Q = -\lambda \cdot A \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

W rozpatrywanym przypadku, z uwagi na dużą rozpiętość temperatur, przyjęto zmienny współczynnik przewodzenia ciepła  $\lambda = \lambda(T)$ . Całkowanie równania (2) przy założeniu stałości przekroju  $A$  na długości  $L$  oraz różnicy temperatur  $T_1$  i  $T_2$  daje następującą zależność:

$$Q = -\frac{A}{L} \int_{T_1}^{T_2} \lambda(T) dT \quad (3)$$

Równanie (3) może być rozwiązane przy użyciu wykresów całek przewodnictwa cieplnego [6] lub wprost jeżeli dla badanego zakresu temperatur będzie znana postać funkcji  $\lambda(T)$ .

Przyjmując, że w układzie występuje stała różnica temperatury  $\Delta T$ , to jak wynika z równania (3), wartość strumienia ciepła zależy od przekroju poprzecznego podpory oraz odwrotnie proporcjonalnie do jej długości i wartości  $\lambda$ .

Konstruując elementy nośne zbiornika kriogenicznego, można poszukiwać rozwiązań w zbiorze danych  $A$ ,  $L$ ,  $\lambda$  przy ograniczeniach wynikających z własności wytrzymałościowych materiału, np. stale konstrukcyjne mają korzystne własności wytrzymałościowe, ale charakteryzuje je wysoki współczynnik przewodności cieplnej, co powoduje, że stal jako materiał na podpory wewnętrzne do zbiorników kriogenicznych jest nieefektywna. W artykule rozważania ukierunkowano na tworzywa sztuczne. Po wstępnej analizie do badań wybrano materiał poliamid PA6 [3, 7, 10]. Wartość współczynnika przewodzenia ciepła w funkcji temperatury oraz opór kontaktowy wyznaczono w badaniach własnych, których wyniki przedstawiono w pracy [7].

### 3. Wpływ kształtu podpory na wartość strumienia cieplnego

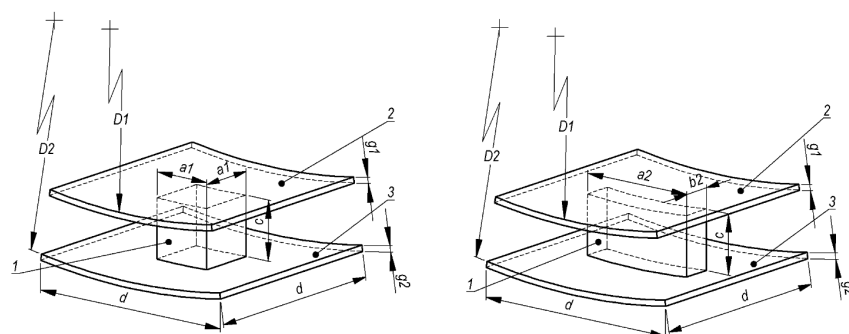
Przy projektowaniu podpór zwykle będą występowały ograniczenia konstrukcyjne, takie jak maksymalna wysokość podpory czy wymiary poprzeczne. Biorąc to pod uwagę zaproponowano kilka postaci konstrukcyjnych. Na rysunku 2 pokazano na wycinku zbiornika względnie proste rozwiązania podparcia zbiornika w postaci brył prostopadłościennych. Wewnętrzny zbiornik o średnicy  $D1$  osadzono na zestawie podpór o przekroju poprzecznym kwadratowym o boku  $a1$  i prostokątnym  $a2 \times b2$  w zbiorniku o średnicy  $D2$ . W badaniach symulacyjnych przepływu ciepła poszukiwano rozwiązań wśród wariantów spełniających wymagania wytrzymałościowe wynikające z obciążenia zbiornika. Do badań symulacyjnych użyto parametrycznych modeli geometrycznych jak na rys. 2. Przyjęto założenia upraszczające, w tym pominięto przekazywanie ciepła przez promieniowanie. Zadano warunki brzegowe w postaci:

- jednorodnego rozkładu temperatury o wartości  $-196^\circ\text{C}$  na wewnętrznej ścianie zbiornika wewnętrznego 2,
- konwekcji naturalnej na zewnętrznej ścianie zbiornika zewnętrznego 3 o wartości współczynnika przenikania  $10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  przy stałej temperaturze otoczenia  $+15^\circ\text{C}$ .

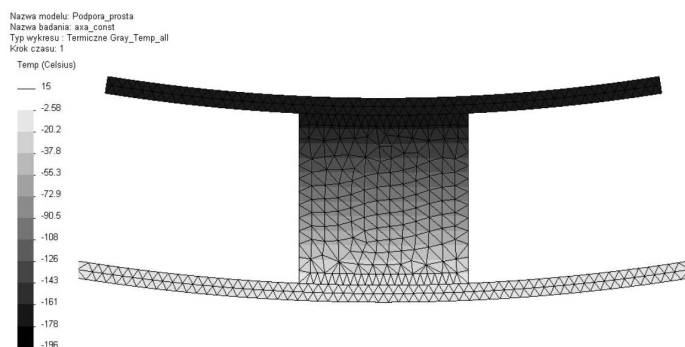
Zbadano wpływ kontaktu cieplnego. Dla porównania przeprowadzono badania ze stałym i zmiennym współczynnikiem przewodzenia ciepła oraz bez i z uwzględnieniem zjawisk kontaktowych. Przyjęto wartość współczynnika oporu kontaktowego  $0,3 \text{ (K m}^2\text{)}/\text{W}$  między elementami 1 i 2 oraz  $0,02 \text{ (K m}^2\text{)}/\text{W}$  między elementami 1 i 3.

Wybrane wyniki analiz dla podpory o przekroju kwadratowym przedstawiono na rys. 3–8, a dla podpory o przekroju prostokątnym na rys. 9–14. Dla wszystkich rysunków przyjęto jednakowe skale temperatur i strumieni cieplnych. Zestawienie danych do obliczeń oraz wybrane wyniki przedstawiono w tabeli 1. Jak wynika z przedstawionych

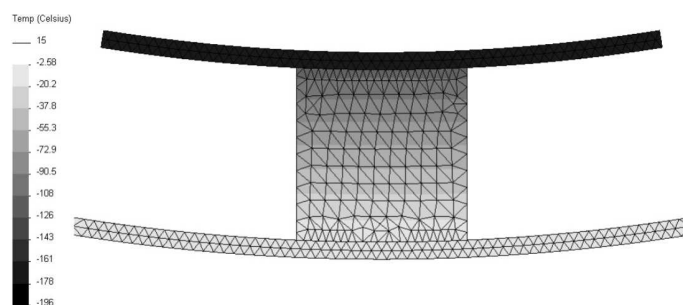
wyników, uwzględnienie zmienności wartości współczynnika przewodzenia ciepła wraz z obniżaniem się temperatury oraz uwzględnienie zjawisk kontaktowych ma istotne znaczenie na uzyskane wyniki. Wpływ zmiany przekroju na ilość ciepła dostarczonego do zbiornika wewnętrznego wydaje się być nieznaczny, natomiast istotnie wpływa na rozkład temperatury na zbiorniku zewnętrznym.



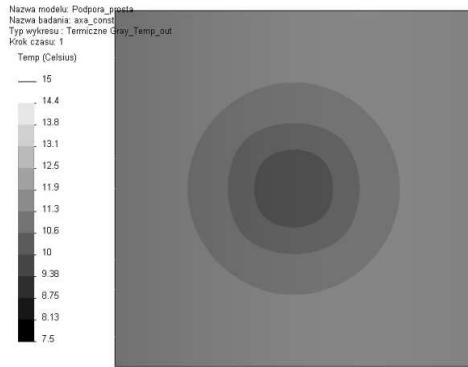
Rys. 2. Modele parametryczne podpór: 1 – podpora, 2 – ściana zbiornika wewnętrznego, 3 – ściana zbiornika zewnętrznego  
 Fig. 2. Parametric models of supports: 1 – support, 2 – inner tank wall, 3 – outer tank wall



Rys. 3. Rozkład temperatury w przekroju przez środek podpory;  $\lambda = \text{const}$   
 Fig. 3. Temperature distribution through the support center;  $\lambda = \text{const}$

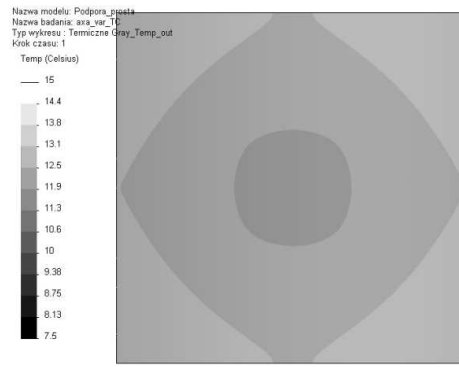


Rys. 4. Rozkład temperatury w przekroju przez środek podpory;  $\lambda = \lambda(T)$  i opór kontaktowy  
 Fig. 4. Temperature distribution through the support center;  $\lambda = \lambda(T)$  and thermal contact



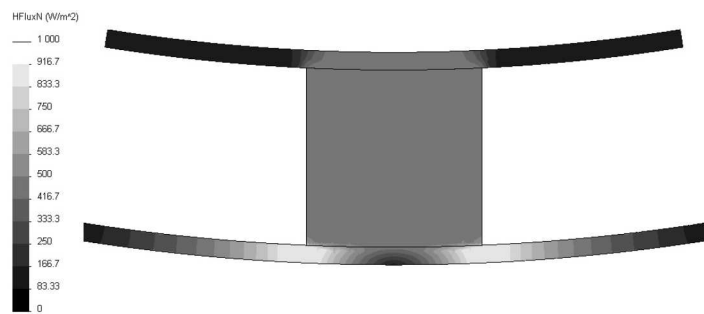
Rys. 5. Rozkład temperatury na powierzchni zewnętrznej zbiornika pod podporą;  $\lambda = \text{const}$

Fig. 5. Temperature distribution on the outer surface of the tank, under the support;  $\lambda = \text{const}$



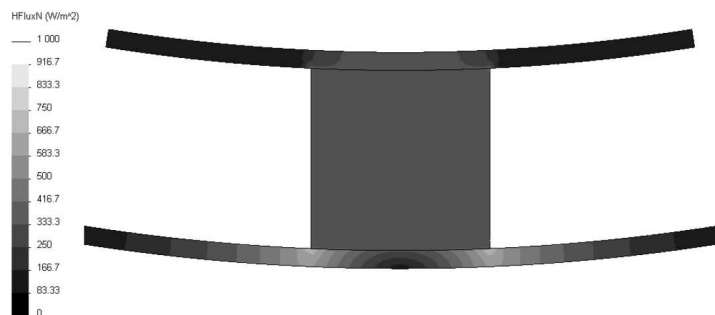
Rys. 6. Rozkład temperatury na powierzchni zewnętrznej zbiornika;  $\lambda = \lambda(T)$  i opór kontaktowy

Fig. 6. Temperature distribution on the outer surface of the tank, under the support;  $\lambda = \lambda(T)$  and thermal contact



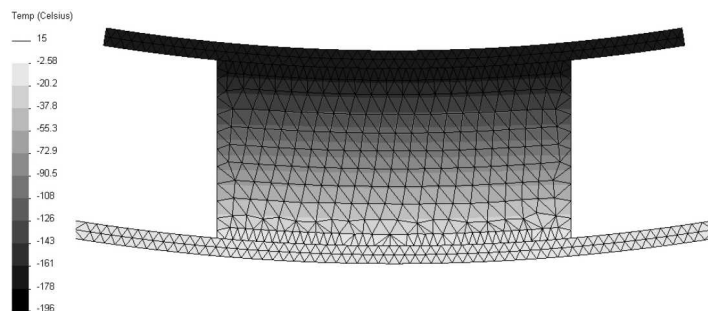
Rys. 7. Rozkład wypadkowego strumienia cieplnego w przekroju przez środek podpory;  $\lambda = \text{const}$

Fig. 7. Distribution of resultant heat flux through the support cross-section;  $\lambda = \text{const}$

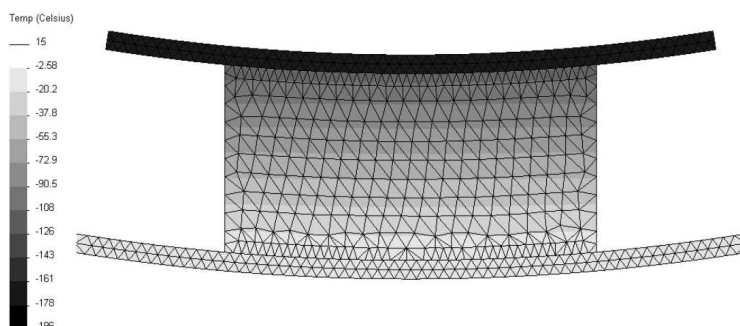


Rys. 8. Rozkład wypadkowego strumienia cieplnego w przekroju przez środek podpory;  $\lambda = \lambda(T)$  i opór kontaktowy

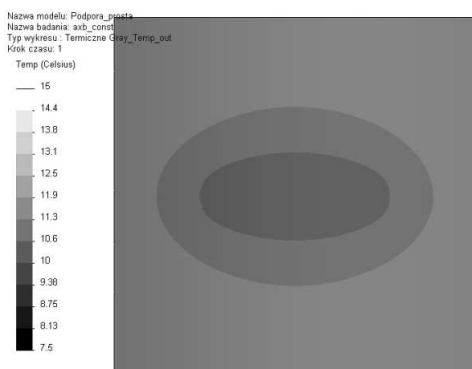
Fig. 8. Distribution of resultant heat flux through the support cross-section;  $\lambda = \lambda(T)$  and thermal contact



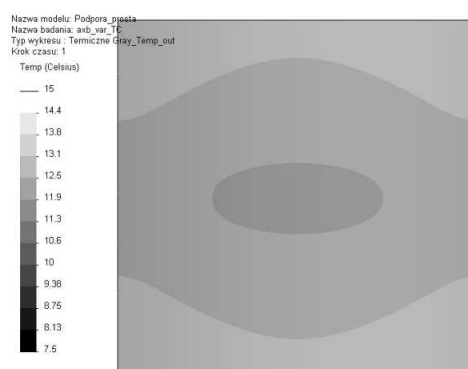
Rys. 9. Rozkład temperatury w przekroju przez środek podpory;  $\lambda = \text{const}$   
 Fig. 9. Temperature distribution through the support cross-section;  $\lambda = \text{const}$



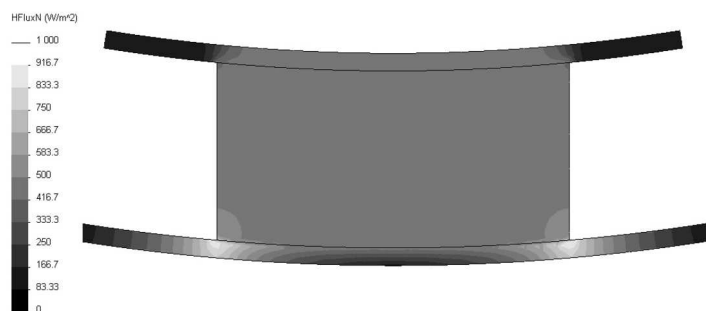
Rys. 10. Rozkład temperatury w przekroju przez środek podpory;  $\lambda = \lambda(T)$  i opór kontaktowy  
 Fig. 10. Temperature distribution through the support centre;  $\lambda = \lambda(T)$  and thermal contact



Rys. 11. Rozkład temperatury na powierzchni zewnętrznej zbiornika.  $\lambda = \text{const}$   
 Fig. 11. Temperature distribution on the outer surface of the tank, under the support;  $\lambda = \text{const}$

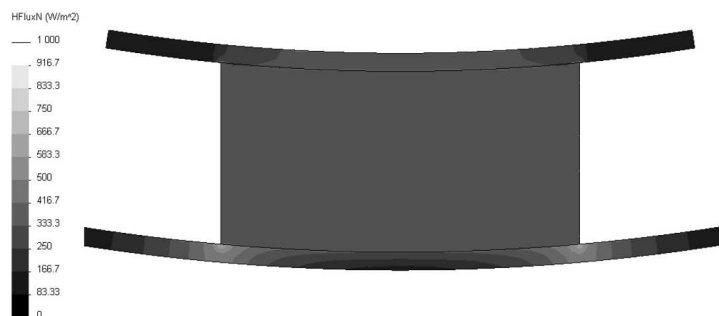


Rys. 12. Rozkład temp. na pow. zewnętrznej zbiornika  $\lambda = \lambda(T)$  i opór kontaktowy  
 Fig. 12. Temperature distribution on the outer surface of the tank, under the support;  $\lambda = \lambda(T)$  and thermal contact



Rys. 13. Rozkład wypadkowego strumienia ciepłego w przekroju przez środek podpory;  $\lambda = \text{const}$

Fig. 13. Distribution of resultant heat flux through the support cross-section;  $\lambda = \text{const}$



Rys. 14. Rozkład wypadkowego strumienia ciepłego w przekroju przez środek podpory;  $\lambda = \lambda(T)$  i opór kontaktowy

Fig. 14. Distribution of resultant heat flux through the support cross-section;  $\lambda = \lambda(T)$  and thermal contact

Tabela 1

Porównanie mocy cieplnej dostarczonej przez podporę z PA06 do zbiornika dla różnych przypadków obliczeniowych

Przekrój podpory	Współczynnik przewodzenia ciepła [W/(m <sup>2</sup> K)]	Ciepły opór kontaktowy na powierzchniach pomiędzy elementami 1 i 2 oraz 2 i 3 [(K m <sup>2</sup> )/W]	Minimalna temp. na powierzchni zewnętrznej zbiornika [°C]	Moc cieplna dostarczona do zbiornika wewnętrznego [W]
a1×a1	$\lambda = 0,23$	–	9,61	4,79
a1×a1	$\lambda = \lambda(T)$	–	10,89	3,65
a1×a1	$\lambda = \lambda(T)$	0,3/0,02	12,02	2,65
a2×b2	$\lambda = 0,23$	–	10,00	4,80
a2×b2	$\lambda = \lambda(T)$	–	11,19	3,66
a2×b2	$\lambda = \lambda(T)$	0,3/0,02	12,24	2,65



#### 4. Wnioski

Praca podejmuje zagadnienia transportu i magazynowania skroplonych gazów, takich jak LNG, ciekły azot, i innych o temperaturze skraplania powyżej  $-200^{\circ}\text{C}$ . Jednym z istotnych elementów konstrukcji wielopłaszczyznowych zbiorników jest wykonanie wewnętrznych podpór o niskim współczynniku przewodzenia ciepła. W pracy do tego celu zaproponowano zastosowanie poliamidu ze względu na jego dobre własności wytrzymałościowe, względnie korzystne współczynniki przewodzenia ciepła, łatwe formowanie do oczekiwanej postaci geometrycznej przy jednocześnie niskich kosztach wykonania. Zaproponowane rozwiązanie podpór wewnętrznych polegające na wykonaniu ich w postaci geometrycznej zbliżonej do bryły prostopadłościennej, która charakteryzuje się małą powierzchnią wymiany ciepła i prostotą wykonania. Zmiana proporcji przekroju nie powoduje istotnej zmiany strumienia ciepła doprowadzanego do ładunku, ale może obniżyć spadek temperatury na powierzchni zewnętrznej zbiornika, co jest istotne z uwagi na możliwość skraplania się pary wodnej znajdującej się w otoczeniu lub oszronienia na ściankach zewnętrznych.

Artykuł powstał w ramach realizacji projektu celowego nr ROW-III-035/2009.

#### Literatura

- [1] Barucci M., Olivieri E., Pasca E., Risegari L., Ventura G., *Thermal conductivity of Torlon between 4.2 and 300K*, Cryogenics 2005.
- [2] Barucci M., Gottardi E., Peroni I., Ventura G., *Low temperature thermal conductivity of Kapton and Upilex*, Cryogenics 2000.
- [3] Barucci M., Bianchini G., Del Rosso T., Gottardi E., Peroni I., Ventura G., *Thermal expansion and thermal conductivity of glass fiber reinforced nylon at low temperature*, Cryogenics 2000.
- [4] Benford D.J., Powers T.J., Moseley S.H., *Thermal conductivity of Kapton tape*, Cryogenics 1999.
- [5] Chitinis M., Agaewal R., Taneja A., Kumar S., Agarwal G., *Metal Replacement and Shape Optimization of Plastic Condenser Brackets Rusing Altair OptiStruct*, Kasna Industrial Estate, India 2008.
- [6] Flynn T.M., *Cryogenic Engineering*, Marcel Dekker, USA 2005.
- [7] Lisowski E., Czyżycki W., Łazarczyk K., *Using of polyamide in construction of supporting blocks of cryogenic tanks on example of LNG container*, Archives of Foundry engineering, Vol. 10, Issue 3, 2010, 81-86.
- [8] Lisowski E., Łazarczyk K., *Badania stanowiskowe nowej konstrukcji kontenera do przewozu płynów kriogenicznych, szczególnie ciekłego azotu i LNG*, Przegląd Mechaniczny, 4, 2010.
- [9] Lisowski E., Czyżycki W., Łazarczyk K., *Simulation and experimental research of internal supports in mobile cryogenic tanks*, Czasopismo Techniczne, 2-M, Wydawnictwo PK, Kraków 2010.
- [10] Ward I.M., Sweeney J., *The mechanical Properties of Solid Polymers*, John Wiley & Sons, Hoboken 2006.

- [11] Yokoyama H., *Thermal conductivity of polyimide film at cryogenic temperature*, Cryogenics 1995.
- [12] Zhou W., Wang C., Ai T., Wu K., Zhao F., Gu H., *A novel fiber reinforced polyethylene composite with added silicon nitride particles for enhanced thermal conductivity*, Composites 2009.