

---

# Badanie systemu do redukcji zmian temperatury nawierzchni mostu (wiaduktu) w cyklach sezonowych i dziennych przez akumulację energii słonecznej z jego powierzchni w gruncie.

## Część II

---

Małgorzata Leszczyńska-Domańska  
Roman Domański

---

### STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono wyniki rozważań dotyczących gruntowych wymienników ciepła, które mają współpracować z wymiennikiem w nawierzchni mostu (wiaduktu) w celu redukcji zmian temperatury nawierzchni. Pokazano wyniki symulacji numerycznej procesów ładowania magazynu i zmiany temperatury gruntu.

---

### Wprowadzenie – metody akumulacji energii na sposób ciepła

W pierwszej części pracy przedstawiono układ do redukcji zmian temperatury nawierzchni w cyklach dziennych i sezonowych oraz omówiono wybrane rozwiązania, a także przedstawiono prace dotyczące wymiennika umieszczonego w nawierzchni mostu.

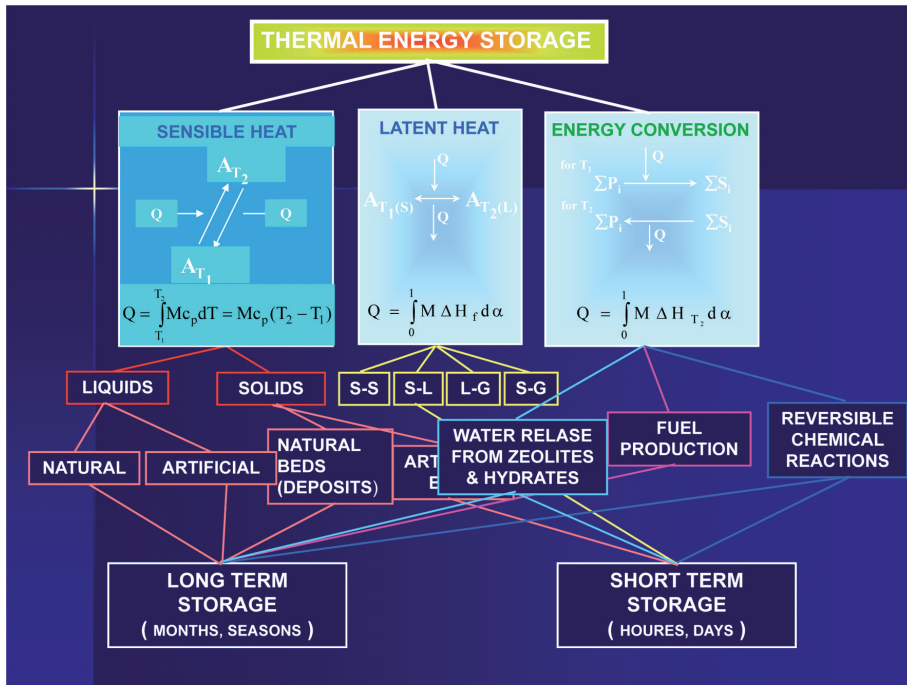
W tej części omówione zostaną metody akumulacji energii na sposób ciepła i przedstawione będą wyniki obliczeń dla wybranych geometrii układu magazynującego, który może współpracować z wymiennikiem w nawierzchni mostu.

Skończone zasoby paliw kopalnych organicznych i jądrowych, przy jednoczesnym wzroście zapotrzebowania na energię pierwotną, wymagają racjonalizacji zużycia energii i zwiększenia sprawności procesów konwersji energii. Tak więc wzrasta znaczenie procesów akumulacji energii w różnych formach [Domański 1990; Gehlin 2000; Leszczyńska-Domańska i in. b.d.; Olszewski 2006].

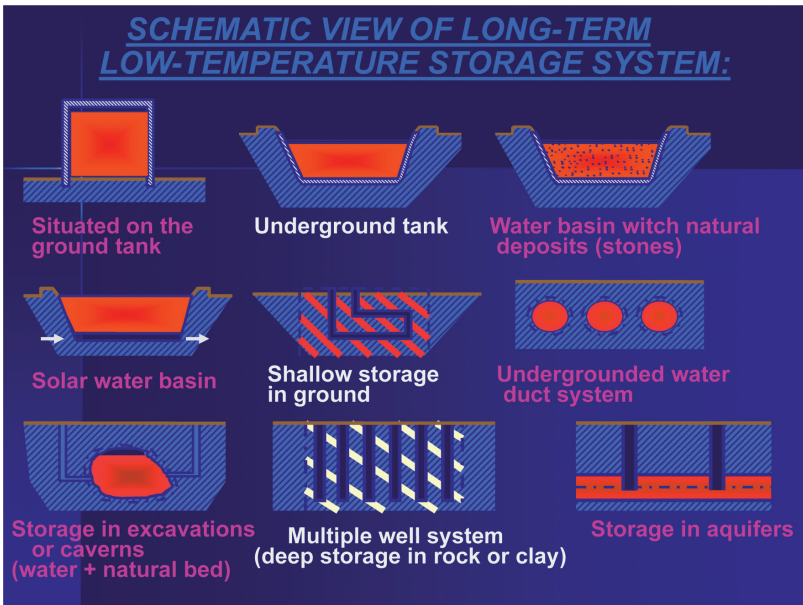
Na *Ryc. 1* przedstawiono schemat możliwości długo- i krótkoterminowego akumulowania energii na sposób ciepła. Jak widać, długoterminowe magazynowanie energii może być realizowane na różne sposoby, ale obecnie najczęściej wykorzystywana jest akumulacja w gruncie i formacjach wodonośnych (ze względów także ekonomicznych). Na *Ryc. 2* przedstawiono najczęściej stosowane układy naziemne i podziemne do akumulacji ciepła [Domański 1990].

Dla systemów akumulacji energii do redukcji zmian temperatury nawierzchni mostu lub wiaduktu wybrano rozwiązanie najczęściej stosowane – pionowe, gruntowe wymienniki

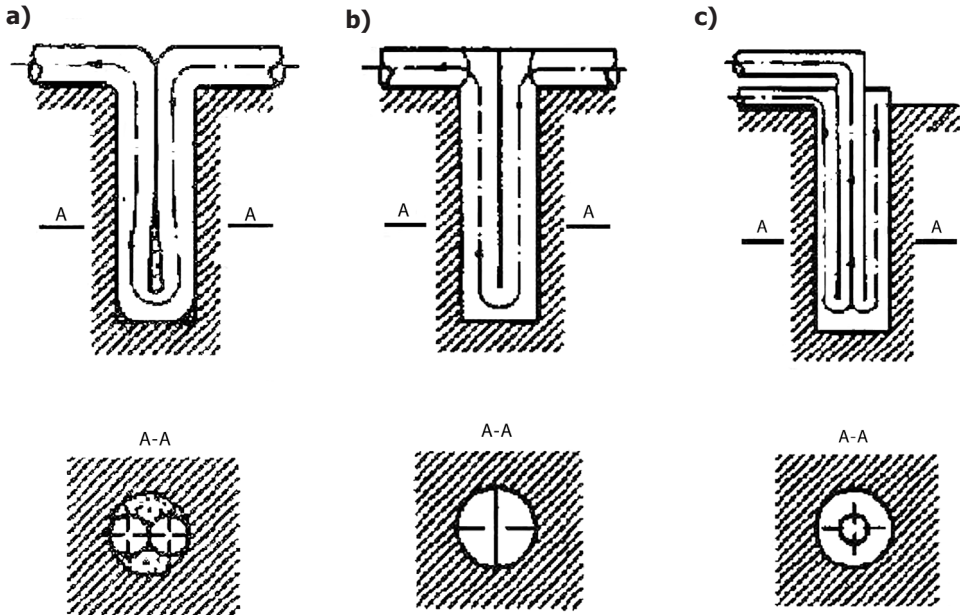
Ryc. 1. Możliwości akumulacji ciepła



Ryc. 2. Schematy układów do długoterminowej akumulacji energii na sposób ciepła



**Ryc. 3. Podstawowe typy gruntowych wymienników ciepła: a) schemat pionowego wymiennika typu U, b) schemat pionowego wymiennika z przepływem przeciwbieżnym, c) schemat pionowego wymiennika z przepływem koncentrycznym (typu Fielda)**



ciepła. Układ taki stosowany jest w wielu różnych instalacjach, jak pokazano w pierwszej części pracy.

Na Ryc. 3 przedstawiono 3 podstawowe rozwiązania dotyczące pionowych gruntowych wymienników ciepła – U rurę, układ z przepływem przeciwbieżnym, układ z przepływem koncentrycznym (wymiennik Fielda).

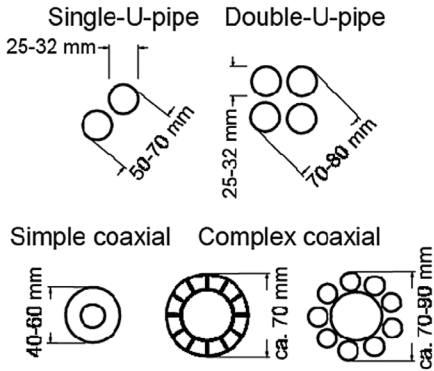
Obecnie stosuje się także bardziej złożone geometrycznie wymienniki, ich przekroje pokazano na Ryc. 4.

W przypadku gdy cały system akumulacji energii jest budowany jednocześnie z podstawową konstrukcją mostu lub wiaduktu, wymienniki gruntowe można umieszczać w palowaniach lub innych elementach konstrukcyjnych fundamentów. Takie rozwiązania dodatkowo są świetnie zabezpieczone przed zniszczeniem i jednocześnie stabilizują temperaturę wokół fundamentów.

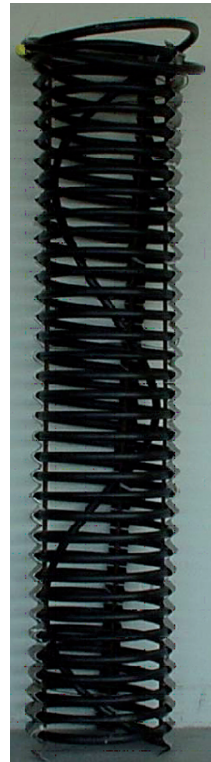
Przykładowo, w Japonii technologia gruntowych wymienników ciepła w układach stalowych rur fundamentowych (dopuszczona do stosowania w roku 1999) jest wdrażana rocznie w ponad 300 dużych budynkach.

Wybór typu gruntowego wymiennika ciepła zależy od wielu czynników zarówno technicznych, jak i ekonomicznych [Domański 1990; Leszczyńska-Domańska, Domański, Olszewski 2007a; Leszczyńska-Domańska i in. b.d.].

**Ryc. 4. Przykłady geometrii stosowanych gruntowych pionowych wymienników ciepła oraz fotografia rury BHE „podwójne – U” o długości 100 m gotowej do montażu**



**Ryc. 5. Stalowe rury fundamentowe, układ rury fundamentowej z zamontowanym wymiennikiem „double-U” oraz widok złożonego wymiennika ciepła do montażu w zbrojonym fundamencie lub otworze**





Pionowe wymienniki ciepła są charakteryzowane przez:

- kształt rur,
- głębokość usytuowania wymiennika,
- długość rur,
- liczbę rur,
- konfigurację ułożenia,
- odległość pomiędzy poszczególnymi rurami,
- materiał, z którego został wykonany wymiennik,
- prędkość przepływu czynnika w układzie.

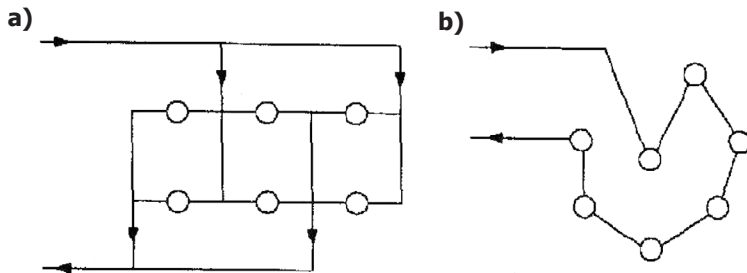
Rury pionowe wymiennika łączy się zwykle równoległe przy pomocy izolowanych poziomych rur umieszczonych na głębokości ok. 1 m pod powierzchnią ziemi. Głębokość ta jest wystarczająca, aby wymiennik nie znajdował się w strefie wpływu dobowych zmian temperatury powietrza zewnętrznego.

Występującym najczęściej typem rur wymiennika obecnie są U-rury i rury koncentryczne, tzw. rury Fielda. Wymiennik typu Fielda zbudowany jest z dwóch koncentrycznie umieszczonych rur, tak że przepływ odbywa się w dwóch kierunkach.

Ze względu na sposób ułożenia wymienników pionowych można rozróżnić układy kołowe i układy wielokątne (rzadziej prostokątne).

Układ rozmieszczenia pionowych wymienników będzie dobierany do rodzaju gruntu i obszaru objętego mierzalnym zaburzeniem dla danego czasu i warunków ładowania.

**Ryc. 6. Przykładowe schematy ułożenia wymienników pionowych: a) ułożenie w konfiguracji siatki prostokątnej; b) ułożenie w konfiguracji wielokątnej**



Pionowe gruntowe wymienniki nie są oczywiście jedynym możliwym rozwiązaniem, jeżeli grunt nie nadaje się do głębokich wierceń można stosować wymienniki powierzchniowe, wykorzystywać formacje wodonośne lub niewielkie zbiorniki wodne [Bose, Smith, Spitler 2002; Domański 1990; Leszczyńska-Domańska 2007].

#### Opis rozważanych układów wymienników ciepła

Przedmiotem badań była analiza cieplna układów, w których grunt jest wykorzystywany jako naturalne źródło energii, służące do celów grzewczych lub ogólniej procesów akumu-

lacji energii. Należy pamiętać, że ogrzewanie powierzchni mostowej może być realizowane przez wykorzystanie energii gruntu i pomp ciepła, bez konieczności ładowania złoża gruntowego energią słoneczną.

W pracy [Leszczyńska-Domańska i in. b.d.] rozważano szereg geometrii dla pojedynczego wymiennika gruntowego, a także różne układy powtarzalne wielu wymienników, aby można je było dobrać do warunków pracy wymiennika w nawierzchni mostu (wiaduktu).

Rozważano także wpływ rodzaju gruntu na obszar objęty mierzalnym zaburzeniem przy różnych warunkach ładowania, magazynowanie nisko- i wysokotemperaturowe [Leszczyńska-Domańska i in. b.d.]. W tym artykule zaprezentowane będą tylko niektóre wyniki badań.

Do badań został przyjęty pionowy, koncentryczny wymiennik ciepła (wymennik Fielda). Rurą zewnętrzną następuje przepływ czynnika obiegowego w dół, natomiast rurą wewnętrzną z dołu do góry. Rozważany był także układ typu U-rura. Rozważania teoretyczne i wyniki symulacji numerycznych zaprezentowane będą dla rury Fielda.

Prawidłowa praca gruntowego wymiennika ciepła zależy od wielu czynników zarówno konstrukcyjnych, jak i klimatycznych. Ze względu na złożoność problemu ograniczono się do określenia wpływu tylko niektórych z nich na przebieg procesu:

- rodzaju gruntu, w którym umieszczony jest wymiennik,
- gradientu geotermalnego,
- prędkości i temperatury załączanego czynnika.

Rozwiązania zagadnienia dokonuje się na drodze teoretycznej poprzez rozwiązanie równania bilansu energii, przy założeniu dwuwymiarowego (lub 3D) obszaru gruntu. Matematycznie problem sprowadza się do rozwiązania odpowiedniego niustalonego równania wymiany ciepła. Zadanie rozwiązano metodami numerycznymi. Dyskretny model został uzyskany na podstawie bilansów energii w skończonych objętościach kontrolnych zdefiniowanych układów każdego węzła siatki i różnicowego przybliżenia na siatce gradientu temperatury. Na podstawie tak postawionego problemu został opracowany program komputerowy w języku FORTRAN 90, C<sup>++</sup>. Istotną część obliczeń wykonano przy wykorzystaniu programu *Fluent* [Leszczyńska-Domańska, Domański, Fałtyń 2008; Leszczyńska-Domańska i in. b.d.].

### **Model fizyczny i matematyczny**

Punktem wyjścia dla określenia pola temperatur w ciele stałym jest równanie różniczkowe niustalonego przewodzenia ciepła, które otrzymuje się na podstawie bilansu energii dla elementarnej objętości substancji [Carslaw, Jeager 1959; Domański i in. 2000; Owczarek 2008; Wiśniewski, Wiśniewski 2000; Zwarycz, Nowak 2002]. W ciele izotropowym współczynniki przewodzenia ciepła  $\lambda$  są we wszystkich kierunkach jednakowe, takie założenie przyjęto do modelowania układu gruntowego wymiennika ciepła. Znajomość parametrów gruntu ma bardzo istotne znaczenie dla modelowania pól temperatury. Przeprowadzając bilans energii dla ciała stałego, uzyskujemy równanie przewodzenia ciepła w postaci:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 T + \frac{1}{\rho \cdot c_p} \cdot \frac{\partial \lambda}{\partial T} \left[ \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{q_v}{\rho \cdot c_p} \quad (1.1)$$

gdzie  $a$  jest współczynnikiem wyrównywania temperatury  $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$  zaś laplasjan temperatury w prostokątnym układzie współrzędnych rozpisuje się następująco [Carslaw, Jaeger 1959; Domański i in. 2000; Wiśniewski, Wiśniewski 2000]:

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1.2)$$

w układzie współrzędnych walcowych:

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1.3)$$

W pracy [Morita, Tago 2000] rozpatrzono przypadek ciała o symetrii walcowej, dla którego przy braku wewnętrznych źródeł ciepła i przy stałym współczynniku przewodzenia ciepła, pole temperatury opisuje równanie:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1.4)$$

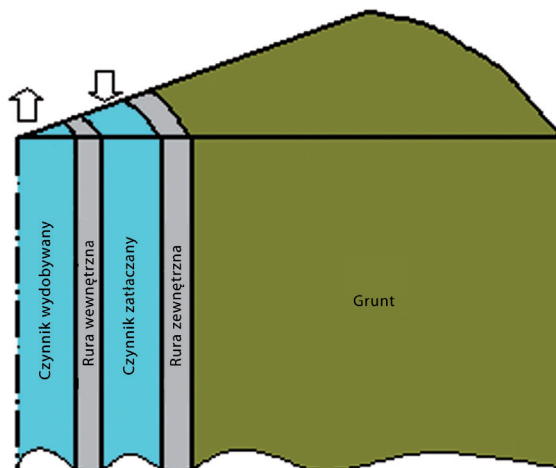
Przejmowanie ciepła od powierzchni ciała stałego przez płyn o temperaturze  $T_p$  opisuje prawo Newtona, które mówi, że gęstość strumienia ciepła przejmowanego przez powierzchnię ciała stałego jest wprost proporcjonalna do różnicy temperatur powierzchni ciała  $T_s$  oraz płynu:

$$q_s = \alpha \cdot (T_s - T_p) \quad (1.5)$$

Współczynnik proporcjonalności  $\alpha$  zwany jest współczynnikiem przejmowania (wnikania) ciepła ( $W/m^2K$ ).

Przyjęty do obliczeń obszar obejmował wymiennik oraz grunt go otaczający, którego zewnętrzny brzeg oddalony był na tyle, by nie wpływać na warunki wymiany ciepła.

**Ryc. 7. Wycinek obszaru obliczeniowego z zaznaczonymi czynnikami roboczymi**



Ze względu na osiową symetrię układu można było rozpatrywać go jako dwuwymiarowy, zakładając, że w kierunku prostopadłym do promienia nie występuje przepływ energii.

W kierunku pionowym (oś  $x$ ) podzielono wymiennik i grunt na  $n$  równych części. Wybór ilości warstw dokonany jest wewnątrz programu. W kierunku promieniowym (oś  $r$ ) przykładowo na dwadzieścia elementów według następującej zasady: pierwszy element to woda wydobywana, drugi i trzeci stanowią rurę wewnętrzną wymiennika, czwarty obejmuje wodę zatłaczaną, kolejne 2 zawierają się w rurze zewnętrznej, a reszta w gruncie. Przy czym podział jest symetryczny w każdym z „obszarów” (grunt, rura wewnętrzna i zewnętrzna).

Dyskretny układ równań algebraicznych, zastępujący różniczkowy opis problemu wymiany ciepła, został uzyskany metodą bilansów elementarnych przez zastosowanie zasady zachowania energii do kontrolnej objętości wokół punktu węzłowego. Zakłada się przewodzenie do węzła. Szczegółowy opis modelu matematycznego, elementów bilansowych i siatek numerycznych (dla programów własnych) można znaleźć w pracach [Carslaw, Jeager 1959; Szargut i in.1992; Wiśniewski, Wiśniewski 2000].

Zakłada się, że w gruncie i w materiale rury wymiana ciepła zachodzi na drodze przewodzenia, natomiast pomija się przewodzenie w płynie, biorąc pod uwagę jedynie strumień konwekcyjny i wymianę masy.

Ze względu na znikomy wpływ zmian temperatury (w rozpatrywanym zakresie) na zmianę współczynników przewodzenia ciepła, zakłada się, że są one stałe i równe wartościom tych współczynników dla pewnej średniej temperatury panującej w rozpatrywanym obszarze.

Dobór siatek w programie *Fluent* wynikał każdorazowo z postawionego zagadnienia i wynosił od 150 tys. do ponad miliona węzłów [Leszczyńska-Domańska, Domański, Fałtyń 2008; Leszczyńska-Domańska, Domański, Olszewski 2007a; Leszczyńska-Domańska i in. b.d.].

### Wybrane wyniki symulacji numerycznych

Wykonano szereg symulacji numerycznych pojedynczych gruntowych wymienników ciepła oraz zestawów odpowiednio usytuowanych pionowych wymienników dla różnych warunków ładowania.

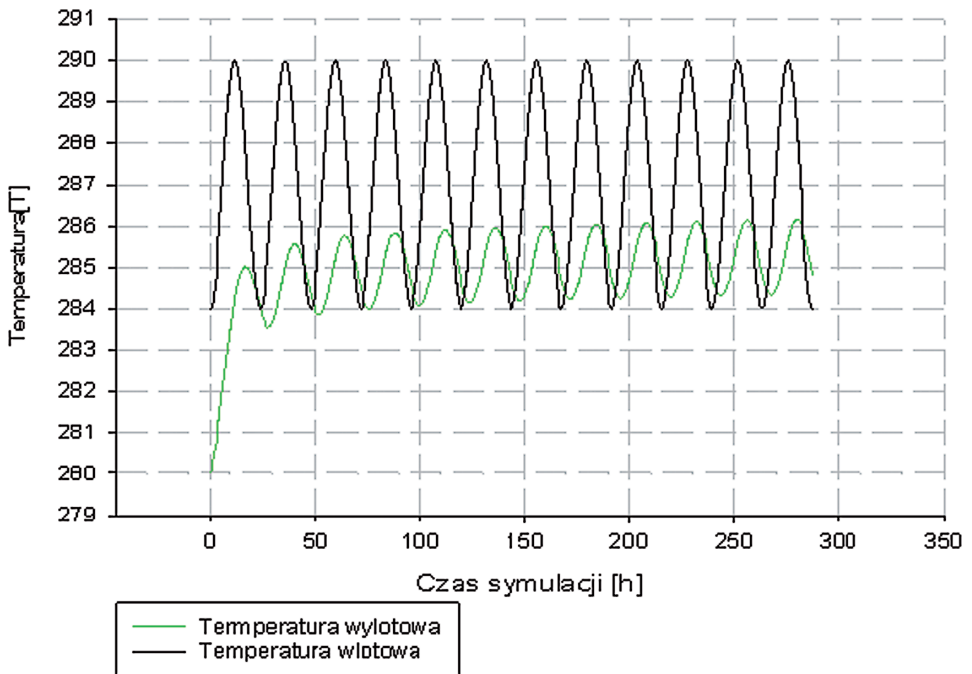
Pierwsze symulacje numeryczne prowadzono w celu ustalenia wpływu rodzaju gruntu na pola temperatury wokół pionowego wymiennika ciepła.

### Warunki początkowe i brzegowe dla pojedynczego wymiennika

Dla chwili czasowej  $\tau = 0$  dla całego wymiennika (rury i czynnik roboczy) przyjęto temperaturę początkową równą temperaturze wody zatłaczanej. Natomiast w gruncie temperatura wzdłuż wymiennika zmienia się wraz z zadaniem gradientem (wybrany gradientem geotermalnym).

Na zewnętrznym brzegu obszaru obliczeniowego (daleki grunt) rozkład temperatury nie zmienia się w czasie – utrzymuje się stan wynikający z pionowego gradientu geoter-

Ryc. 8. Temperatura wlotowa i wylotowa glikolu



malnego. Dolny brzeg przyjmuje się jako adiabatyczny z wyjątkiem elementów czynnika roboczego, gdzie strumienie dla wody zatłaczanej i wydobywanej muszą być sobie równe. Oś wymiennika przyjmuje się jako adiabatyczną. Górny brzeg obszaru obliczeniowego dla gruntu przyjmuje się jako izotermiczny, dla rur wymiennika jako adiabatyczny. Prowadzono obliczenia dla różnych warunków dotyczących temperatury wody zatłaczanej od wartości stałej do realnych warunków, a więc temperatury zmiennej wynikającej z pracy wymiennika w nawierzchni mostowej. Na granicach między poszczególnymi częściami wymiennika oraz gruntem przyjmuje się warunki brzegowe określonego procesami przewodzenia ciepła i konwekcji.

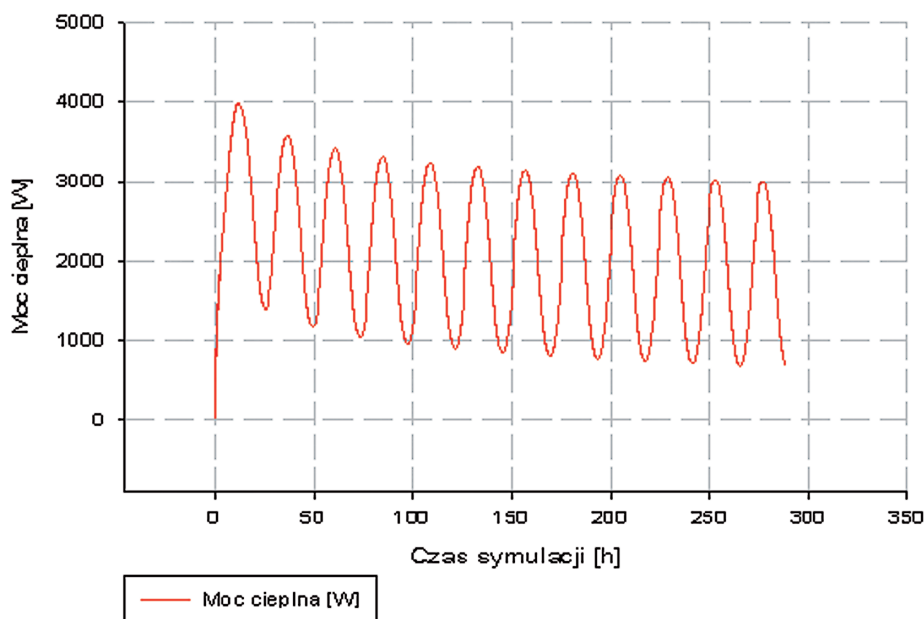
Wykorzystując możliwości programu *Fluent*, wykonano symulacje procesu ładowania gruntu przy użyciu rury Fielda dla identycznych warunków, jak dla programów własnych, uzyskując zgodność wyników.

Testowano dalej program *Fluent* dla bardziej złożonych warunków – ładowanie magazynu gruntowego z modelem zmiennej temperatury na wlocie z uśrednionego dnia czerwca (z 15 na 16 czerwca).

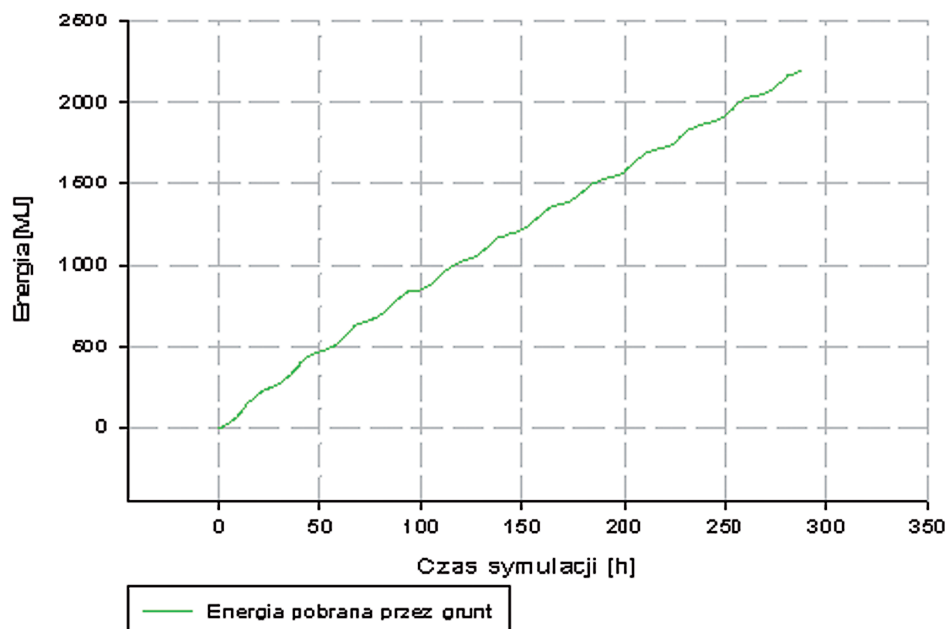
W celu uzyskania informacji o pracy gruntowego wymiennika ciepła ładowanego zgodnie z zasilaniem z modułu mostu przeprowadzono symulację dla różnych czasów ładowania (do 280 godzin). Warunki ładowania przyjęto dla temperatury ładowania dla uśrednionego dnia czerwca (z 15 na 16 czerwca). Na Ryc. 8 przedstawiono zmiany temperatury wlotowej



Ryc. 9. Moc cieplna oddawana przez ściankę zewnętrzną rury zewnętrznej do gruntu



Ryc. 10. Zmiany energii pobieranej przez grunt w funkcji czasu ładowania



do rury Fielda i wylotowej w funkcji czasu. Jak wynika z symulacji, temperatury wylotowe (zgodnie z fizyką procesów) rosną, ponieważ grunt się wygrzewa.

Na Ryc. 9 przedstawiono moc cieplną oddawaną przez całą rurę do gruntu w funkcji czasu ładowania. Po 250 godzinach cyklicznego ładowania ilość energii oddawanej w jednostce czasu stabilizuje się na poziomie 3000 W, co daje wskaźnik 3000/80 W/mb.

Ryc. 10 przedstawia zmiany energii pobieranej przez grunt w funkcji czasu ładowania. Jak widać, magazyn nadal może być dość efektywnie ładowany (dla warunków ładowania ze średniego dnia czerwca).

Na Ryc. 11 przedstawiono rozkład temperatury wzdłuż promienia dla kolejnych warstw (dla głębokości 2, 10, 38, 50, 80 m) dla czasu ładowania 11,5 dnia (godzina 15.00).

Na Ryc. 12 przedstawiono rozkład temperatury dla tego samego czasu dla różnych promieni w funkcji długości wymiennika rurowego.

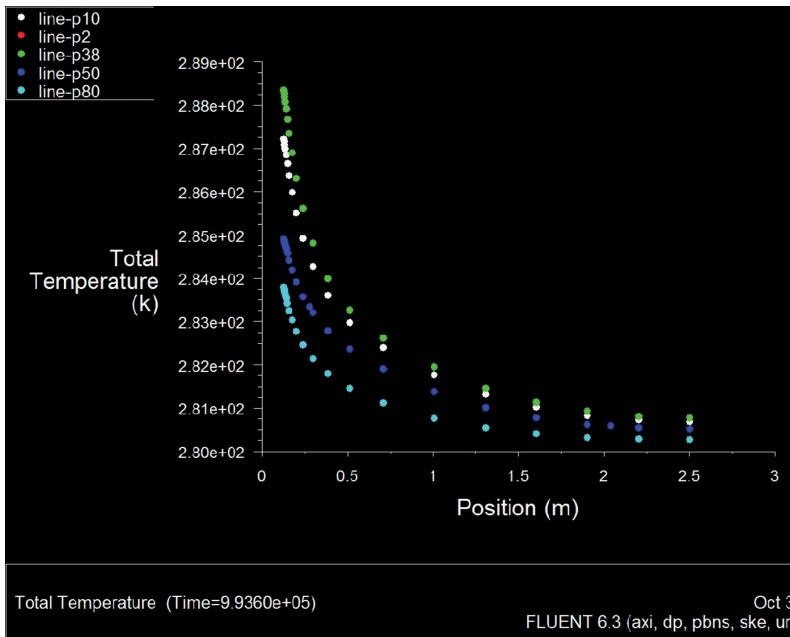
Na ryc. 13 i 14 przedstawiono odpowiednio wyniki symulacji pól temperatury po 12 dniach ładowania dla godziny 3.00.

Po 12 dniach ładowania nadal  $\Delta T$  czynnika ładującego wynosi około  $15^{\circ}\text{C}$  i magazyn nadal ładuje się. Z czego wynika, że opór cieplny gruntu nadal pozwala na jego ładowanie.

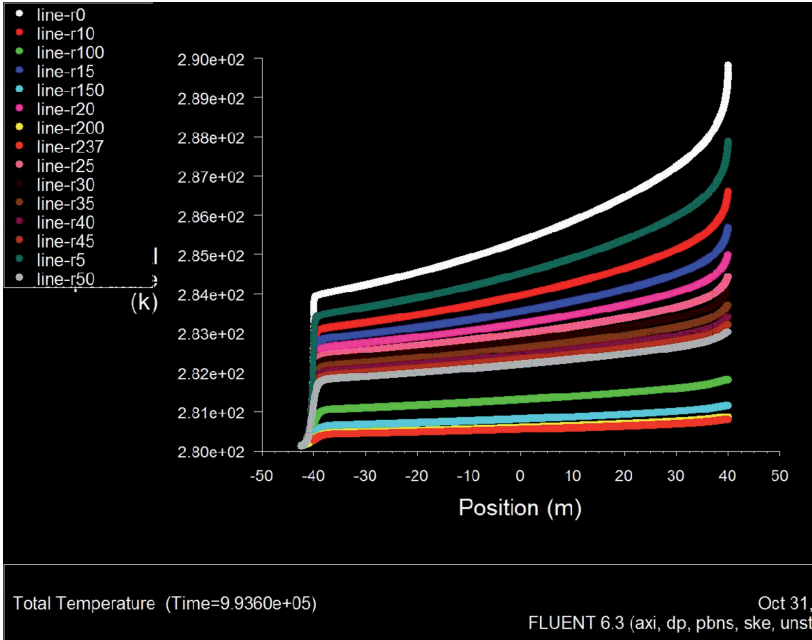
W jedenastym dniu ładowania istotne są gradienty temperatury pionowe w gruncie i to powoduje dodatkowy transport energii w kierunku pionowym.

Zasadnicze znaczenie miały jednak rozważania dotyczące akumulacji energii na sposób ciepła dla wybranych modułów magazynujących (zestawu wymienników pionowych).

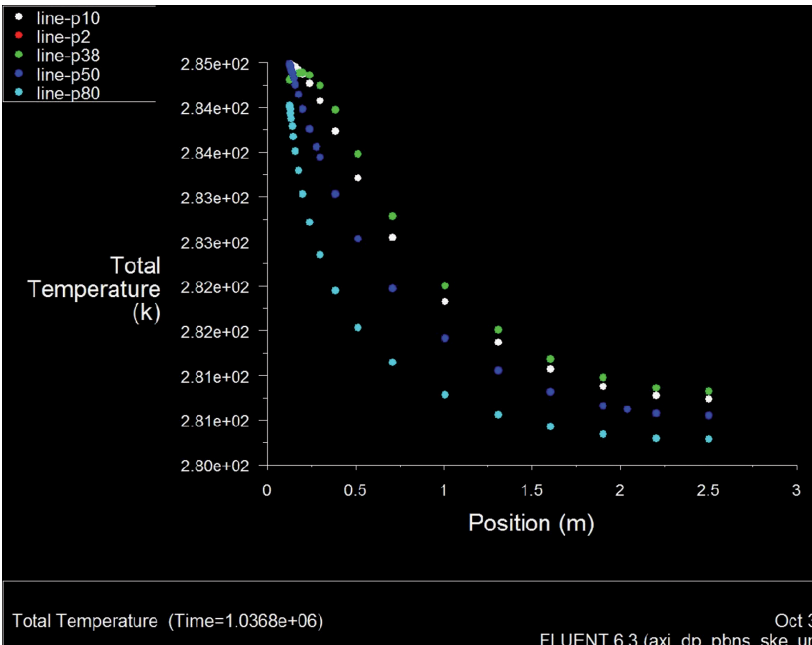
**Ryc. 11. Rozkład temperatury w funkcji promienia**



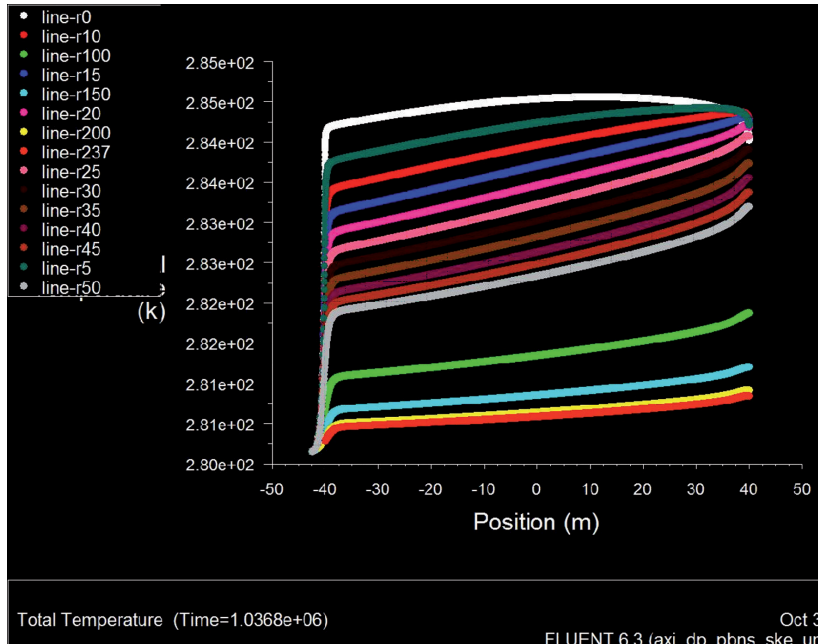
Ryc. 12. Rozkład temperatury dla tego samego czasu dla różnych promieni w funkcji długości wymiennika rurowego



Ryc. 13. Rozkład temperatury wzdłuż promienia dla kolejnych warstw



**Ryc. 14. Rozkład temperatury dla tego samego czasu dla różnych promieni w funkcji długości wymiennika rurowego**



**Wyniki symulacji numerycznej 3D – modułu magazynu gruntowego przy wykorzystaniu programu *Fluent***

*Podstawowe informacje o badanym gruntowym wymienniku ciepła przy użyciu programu *Fluent*.*

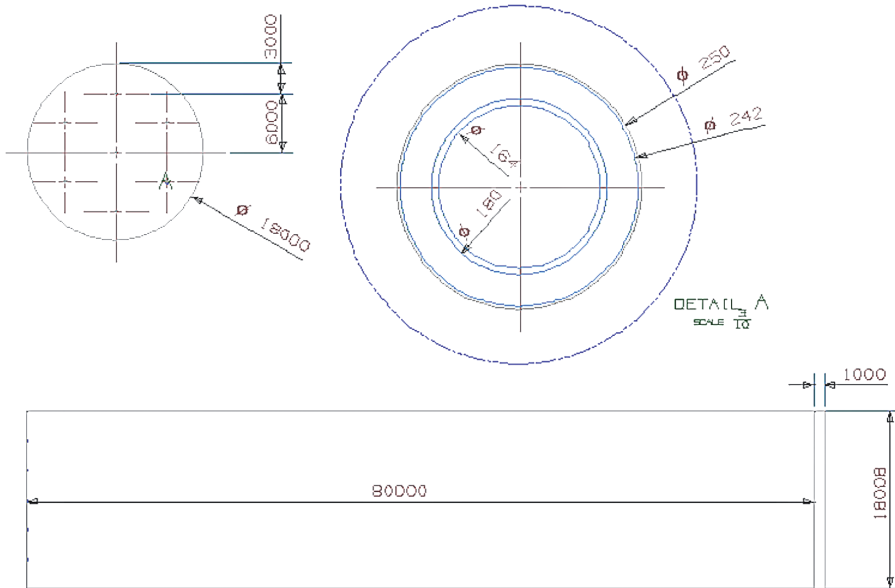
Na Ryc. 15 przedstawiono wymiary rury Fielda oraz układ geometryczny rur w powtarzalnym elemencie – module akumulatora gruntowego.

Przedmiotem rozważań jest rura Fielda o średnicy rury zewnętrznej 250 mm, średnicy wewnętrznej 164 mm (patrz przekrój A). Moduł składa się z siedmiu takich rur rozmieszczonych zgodnie z rysunkiem w walcu o średnicy 18 m. Na podstawie danych z badań prowadzonych w ramach Aneksów IEA, dotyczących akumulacji energii w gruncie średnice pojedynczych rur Fielda wynoszą od 400 do 150 mm, zależnie od rodzaju gruntu, sposobu wiercenia i konstrukcji samej rury. Głębokości odwiertu też znacznie mogą się różnić i wynoszą od kilkunastu do 150 m.

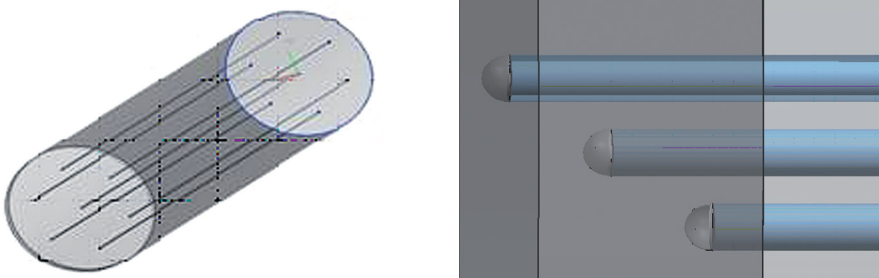
Rozważano modele osiowo symetryczne i pełne modele 3D.

W prezentowanych wynikach temperatura wlotowa podwyższona została o 10°C w stosunku do poprzednio rozważanej temperatury wlotowej. W modelu 3D na podstawie wytycznych projektowych grubości rur wynoszą odpowiednio dla rury wewnętrznej 8 mm, dla rury zewnętrznej 4 mm.

**Ryc. 15. Podstawowe dane geometryczne pojedynczego wymiennika gruntowego i całego modułu**



**Ryc. 16. Geometria układu rur i widok ich końcówek**



**Podstawowe dane dotyczące długotrwałej symulacji 3D:**

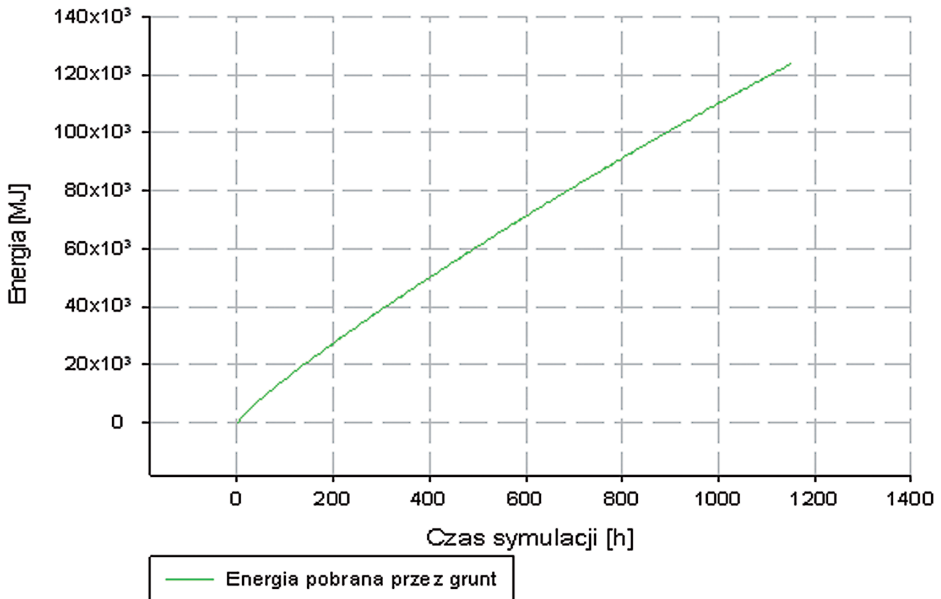
- ilość rur w układzie: 7 ułożonych na planie sześciokąta foremnego; patrz rysunki dotyczące geometrii całego modułu,
- przepływ masowy czynnika: 0,26 kg/s indywidualnie przez każdą z rur (oznacza to, iż jedna rura wymiennika pracuje na jeden segment mostu); czynnikiem roboczym jest glikol,
- temperatura czynnika roboczego: na kolejnych rysunkach przedstawione zostały obliczenia zrealizowane dla temperatury wylotowej z mostu (wlotowej do wymienni-



- ka magazynu gruntowego) z czerwca dodatkowo zwiększonej o 10°C (sinusoidalnie zmienna),
- czas obliczeń: 48 dni.

### Wyniki obliczeń – wybrane przykłady

Ryc. 17. Energia pobrana przez grunt



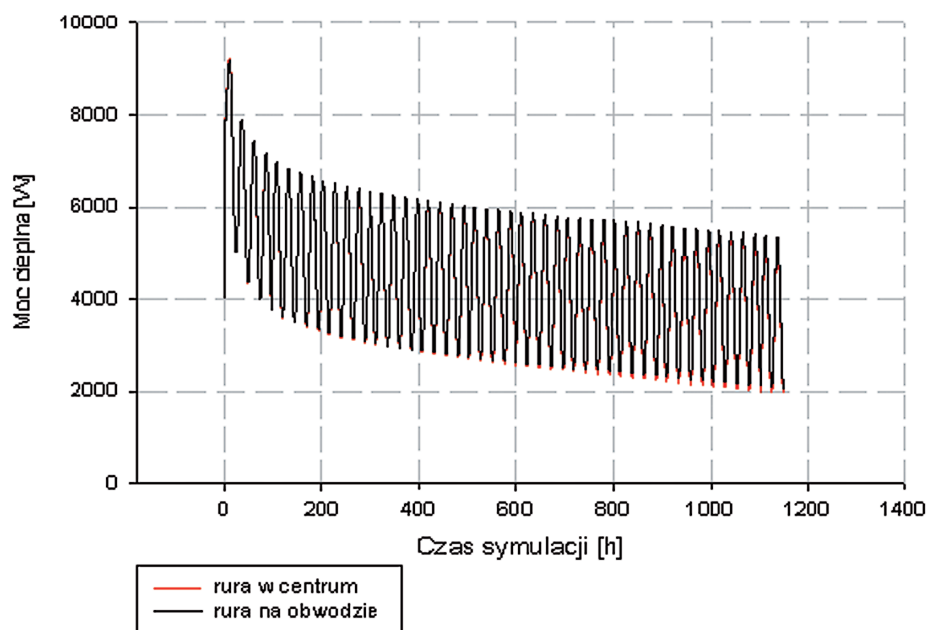
Przy podwyższeniu temperatury czynnika roboczego o 10°C magazyn gruntowy podlega procesowi ładowania (w tej przyjętej konfiguracji) nawet dla ponad 48 dni ładowania. A więc będzie mógł efektywnie pracować przez prawie 2 miesiące w okresie letnim (patrz Ryc. 17).

Pracę całego modułu magazynu można także ocenić na podstawie Ryciny 18. Jak wynika z symulacji numerycznej, moc ciepła w czasie alternatywnego procesu ładowania spada, ale jest podobna dla każdego z pojedynczych wymienników, a więc magazyn nawet dla tak długotrwałego ładowania jest dobrze zaprojektowany i będzie mógł efektywnie odbierać energię w miesiącach letnich.

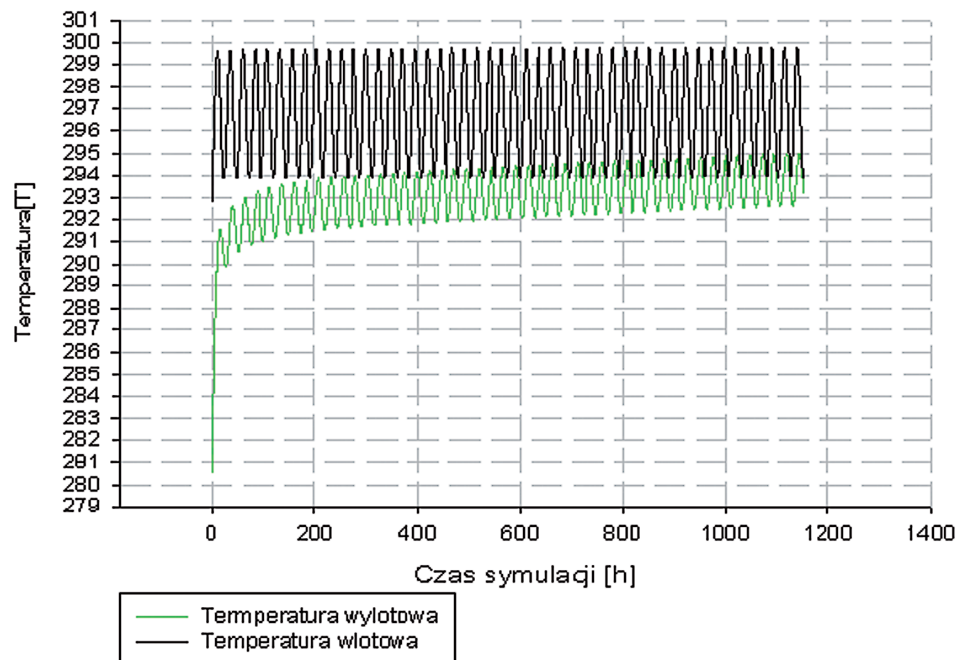
Jak wynika z Ryc. 19, temperatura wylotowa glikolu od początku procesu ładowania wzrosła o około 3,5°C i już od 280 h ładowania przekracza najniższą temperaturę wlotową do rury Fielda, tak więc od tego momentu efektywność przejmowania ciepła wymiennika pracującego w nawierzchni dla godzin z małym usłonecznieniem będzie spadać i dalszy odbiór energii będzie mało efektywny [Leszczyńska-Domańska i in. b.d.].

Aby lepiej poznać realne rozkłady temperatury, na kolejnych rysunkach przedstawiono rozkłady temperatury 2D dla poszczególnych głębokości wzdłuż modułu wymiennika i powiększono wydruki profili 3D.

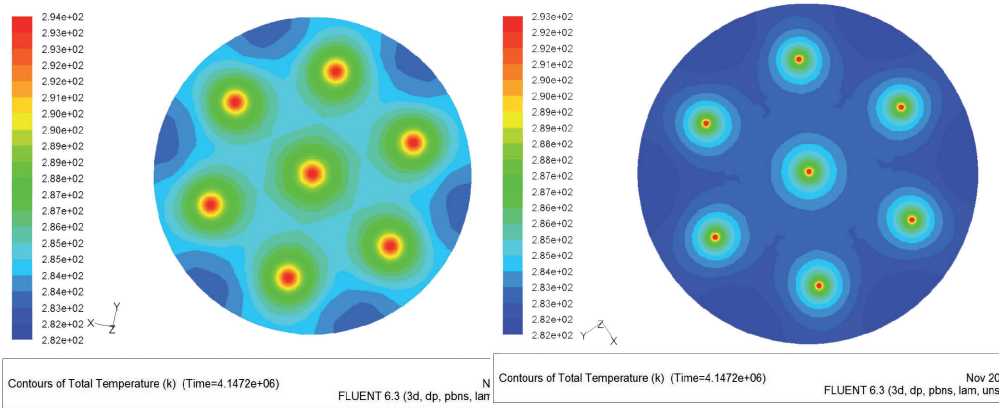
Ryc. 18. Moc ciepła oddawana przez ściankę zewnętrzną rury zewnętrznej w kierunku gruntu



Ryc. 19. Temperatura wylotowa i wlotowa glikolu w rurze centralnej



**Ryc. 20. Porównanie pól temperatury gruntu po upływie 48 dni na głębokości 0 i 80m**



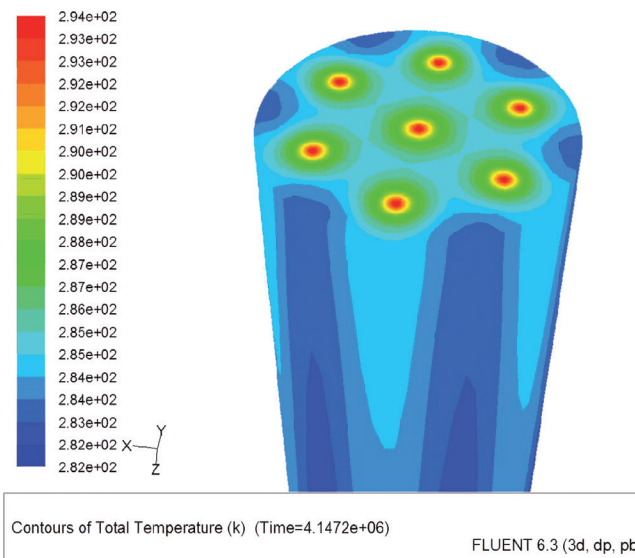
Na Ryc. 20 przedstawiono 2D pola temperatury [Leszczyńska-Domańska i in. b.d.] na powierzchni wymiennika ( $z=0$  i  $z=80$ m).

Widać, że przy założonych po upływie 48 dni nadal istnieje możliwość doładowania modelu.

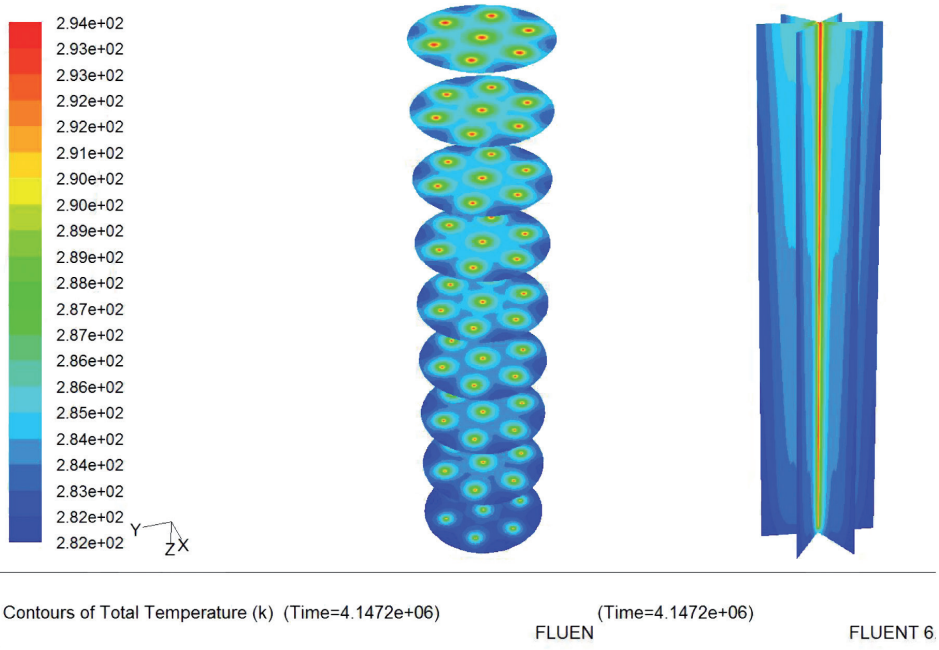
Zmiany pola temperatury 2D dla przekrojów leżących na różnej głębokości przedstawiono na kolejnych rysunkach.

Jak wynika z przedstawionych wyników symulacji, na głębokości 80 m (koniec wymiennika) obszar objęty mierzalnym zamówieniem jest stosunkowo niewielki.

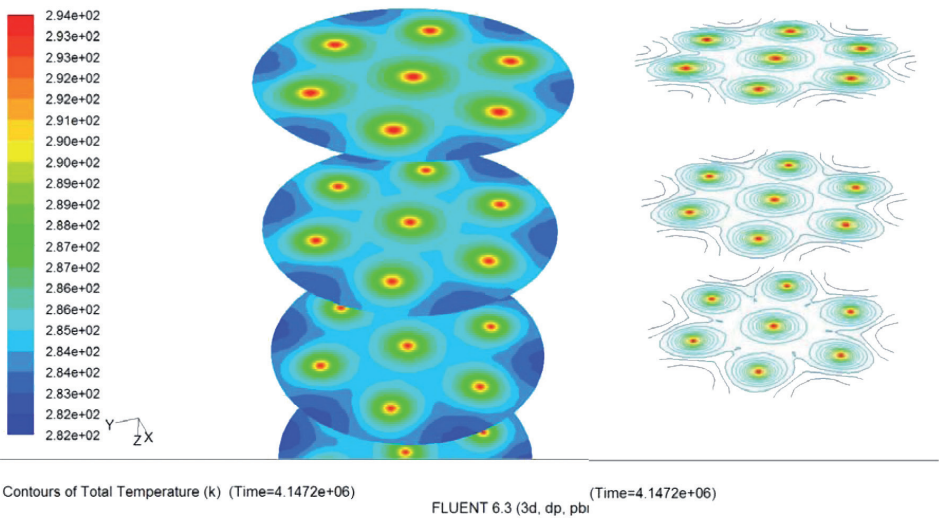
**Ryc. 21. Temperatura gruntu po upływie 48 dni**



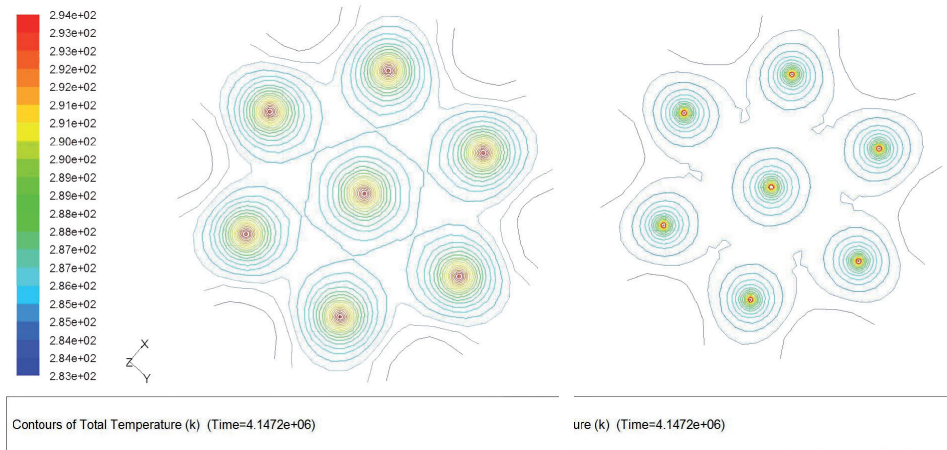
Ryc. 22. Przekroje temperatury gruntu co 10 m i obraz pola 3D – po upływie 48 dni



Ryc. 23. Przekroje pola temperatury gruntu co 10 m, począwszy od 0 m, oraz odpowiedni widok izoterm – po upływie 48 dni



Ryc. 24. Izotermy w gruncie po upływie 48 dni na głębokości 0 i 80 m



Przedstawione wyniki symulacji numerycznej potwierdzają przydatność programu *Fluent* do badań pól temperatur dla modułu gruntowego wymiennika ciepła. Uzyskane rezultaty dotyczące rozkładu temperatury oraz ilości energii zmagazynowanej w przypadku podwyższonej temperatury ładowania (a więc np. wdrożenia pomp ciepła lub układu kolektorowego) pozwalają na dobór i zaprojektowanie akumulatora energii na sposób ciepła.

Przygotowane narzędzia do symulacji numerycznej i uzyskane wyniki w pełni potwierdzają możliwość wykorzystania wymiennika gruntowego do współpracy z układem wymiennika w nawierzchni mostu (wiaduktu) do redukcji zmian temperatury nawierzchni w cyklach dziennych i sezonowych, a także jej odładzania. Zagadnienia te są prezentowane w pracach [Leszczyńska-Domańska, Domański, Olszewski 2007b; Leszczyńska-Domańska, Domański 2009; Liu, Rees, Spitler 2003; Morita, Tago 2000; Leszczyńska-Domańska 2007].

### Podsumowanie

W projekcie badawczym [Morita, Tago 2000] wykonano analizę istniejących systemów dotyczących wykorzystania energii promieniowania słonecznego do ogrzewania i odładzania nawierzchni. Przeprowadzono analizę kilku wybranych konstrukcji mostowych i na bazie tej analizy wybrano parametry geometryczne i materiałowe do symulacji numerycznych i obliczeń.

Zaproponowano różne warianty wymiennika do chłodzenia i ogrzewania nawierzchni mostu. Przedstawiono rozważania dotyczące spadków ciśnienia w wymienniku, zaproponowano 3 różne geometrie wymienników w nawierzchni, dobrane do różnych rozwiązań konstrukcyjnych mostu. Przedstawiono modele procesu konwersji i odbioru energii promieniowania słonecznego z nawierzchni. Zebrano dane meteorologiczne dla rozważanego regionu i przedstawiono szczegółowe symulacje numeryczne pól temperatury dla wybra-



nych dni w roku oraz ilości energii możliwej do odprowadzenia do akumulatora energii. Do symulacji numerycznej wykorzystano programy *Fluent* i *Partran Thermal* oraz własne oryginalne programy (*Fortran*, *V-Basic*, *C++*). Wykonano obliczenia dla długich czasów pracy wymiennika (przedstawiono odpowiednie wykresy pokazujące szczegółowo zmiany temperatury w cyklach dobowych dla wybranych dni w roku). Na podstawie symulacji numerycznych uzyskano pełne informacje o ilościach energii możliwej do pozyskania w ciągu reprezentatywnych dni w różnych miesiącach roku i na tej podstawie ilość energii w ciągu roku z różnych typów wymienników (dla różnych nawierzchni) [Carslaw, Jeager 1959; Leszczyńska-Domańska i in. b.d.].

W pracy [Leszczyńska-Domańska i in. b.d.] przeprowadzono analizę gruntowych wymienników ciepła do akumulacji energii promieniowania słonecznego. Po analizie możliwych rozwiązań skoncentrowano się na analizie wymiennika typu Fielda (rura w rurze) dla różnych geometrii rury, materiałów. Rozważano wymienniki o średnicach rury zewnętrznej od 400 mm do 200 mm i jej długościach od 20 m do 90 m. Najobszerniej wyniki przedstawiono dla rur o długości 80 m. Na świecie stosowane są wymienniki do 150-200 m, ale ze względu na koszty odwiertów w Polsce rezultatów dla takich wymienników nie prezentowano. Zbudowano odpowiednie modele matematyczne, przygotowano szereg programów własnych oraz aplikacji do symulacji procesów akumulacji energii w gruncie. Programy te były podstawą weryfikacji wyników uzyskiwanych przy pomocy programów profesjonalnych dla bardziej złożonych zmiennych w czasie warunków pracy oraz układów wymienników gruntowych. Celem tych programów i aplikacji było określenie wpływu parametrów gruntu, geometrii wymiennika, gradientu geotermalnego na obszar objęty mierzalnym zaburzeniem dla różnych temperatur ładowania i wydatków czynnika grzejącego lub chłodzącego. Te podstawowe oryginalne kody własne pozwoliły na ostateczny dobór geometrii pojedynczego wymiennika oraz układu wymienników (modułów). Zasadnicze znaczenie dla obliczeń procesów wymiany ciepła ma znajomość parametrów gruntu (jego przewodność może się zmieniać od wartości 0,55 W/(mK) – grunt suchy do wartości 2,7 W/(mK) – grunt wilgotny. Ilość energii odbieranej w jednostce czasu z metra bieżącego wymiennika zmienia się wtedy w zakresie od 16,9 W/m do 34,1 W/m.

Na bazie algorytmów genetycznych [Leszczyńska-Domańska i in. b.d.; Olszewski 2006] rozważono dobór wymienników w module oraz przeprowadzono uproszczone, a następnie 3D wymiarowe symulacje ładowania wymiennika dla temperatur zmiennych (zgodnych w uproszczeniu z temperaturami otrzymywanymi z wymiennika z nawierzchni) w funkcji czasu dla szeregu dni w roku. Ustalono pola temperatur i ilości energii akumulowanej dla czasów ładowania (wyniki 3D) do 400 h. Analizę pracy gruntowych wymienników ciepła poszerzono o pracę przy podwyższonych temperaturach czynnika roboczego ze względu na możliwość zastosowania pomp ciepła lub dodatkowo układów kolektorów słonecznych.

Dla poziomych wymienników ciepła (rury  $\Phi 40-50$  m, na głębokości poniżej 1,5 m), zależnie od rodzaju gruntu, potrzeba 30-100 m wymiennika na 1 kW energii pobranej. Dla wymienników pionowych, zależnie od rozwiązania, niezbędne jest 10-20 m/kW.

Zaproponowano modele dotyczące topnienia śniegu i lodu oraz przedstawiono wyniki

symulacji numerycznej tych procesów dla wybranych geometrii i warunków pracy wymiennika w nawierzchni.

Przeprowadzono analizy porównawcze dla wybranych dni w roku zmian temperatury nawierzchni z jej dogrzewaniem i bez dogrzewania.

Przy pomocy programu *Fluent* dokonano symulacji numerycznej procesów ciepłno-przepływowych dla całego mostu o założonym przekroju. W rozważonym układzie możliwe, a w niektórych przypadkach wręcz celowe, jest stosowanie pomp ciepła do podwyższania temperatury czynnika w procesie ładowania oraz w procesie rozładowania.

W wyniku realizacji projektu *Badanie systemu do redukcji zmian temperatury nawierzchni mostu (wiaduktu) w cyklach sezonowych i dziennych przez akumulację energii słonecznej z jego powierzchni w gruncie* [Leszczyńska-Domańska i in. b.d.] poszerzono wiedzę na temat kompleksowego układu źródła energii – magazyn gruntowy, przygotowano narzędzia do projektowania i wdrażania układu – źródło.

Prowadzone od szeregu lat prace dotyczące konwersji promieniowania słonecznego i akumulacji energii, których podsumowaniem są wyniki uzyskane w ramach grantu badawczego [Leszczyńska-Domańska i in. b.d.] i pracach [Leszczyńska-Domańska, Domański, Olszewski 2007b; Leszczyńska-Domańska, Domański 2009; Olszewski 2006; Owczarek 2008] w pełni potwierdzają możliwość wykorzystania energii promieniowania słonecznego do redukcji zmian temperatury nawierzchni drogi (mostu, wiaduktu) w cyklach krótko- i długoterminowych (odładzanie i odsnieżanie w warunkach zimowych). Doświadczenia badawcze zespołu i opanowane narzędzia obliczeniowe w pełni uzasadniają podjęcie działań nad realizacją takiego wdrożenia w Polsce.

## Literatura:

Bose J.E., Smith M.D., Spitler J.D., 2002, *Advances in Ground Source Heat Pump Systems – An International Overview, Proceedings of the Seventh International Energy Agency Heat Pump Conference, Beijing, May 19-22, t. 1, s.313-324.*

Carslaw H.S, Jeager J.C., 1959, *Conduction of heat in solids*, Oxford University Press, Oxford.

Chiasson A., Spitler J., 2000, *A modeling approach to design of a ground-source heat pump bridge Deck Heating System*, Oklahoma State University, School of Mechanical & Aerospace Engineering, Stillwater.

Domański R., 1990, *Magazynowanie energii cieplnej*, Warszawa.

Domański i in. 2000, Domański R., Jaworski M., Rebow M., Kołtyś J., *Termodynamika w ujęciu komputerowym*, Warszawa.

Gehlin S., 2000, *Heat Storage Applications*, Winter Cities 2000 Energy and Environment, Lulea Sweden.

Leszczyńska-Domańska M., 2007, *Symulacja numeryczna zmian temperatury nawierzchni w cyklach sezonowych przy wykorzystaniu gruntowych magazynów energii*, (w:) Międzynarodowa Konferencja Naukowa Transport XXI Wieku, Stare Jabłonki, 18-21 września 2007.

Leszczyńska-Domańska M., Domański R., Fałtyn M., 2008, *Numerical simulation of the processes of receipt of solar energy from the surface of the bridge in order to stabilize the temperature in short – and long – term cycles.*, SOLPOL 2008, International Conference Renewable Energy Innovative Technologies and New Ideas, Warszawa.

Leszczyńska-Domańska M., Domański R., Olszewski P., 2007a, *Analiza możliwości długoterminowego magazynowania wysokotemperaturowego ciepła odpadowego w gruncie*, Politechnika Warszawska, Prace Naukowe, Konferencje, z. 25, VIII konferencja, Problemy Badawcze Energetyki Ciepłej, t. 1, s.329-337.

Leszczyńska-Domańska M., Domański R., Olszewski P., 2007b, *Wykorzystanie energii promieniowania słonecznego do roztopiania warstwy śniegu na nawierzchni mostów w polskich warunkach klimatycznych – gruntowy magazyn energii*, (w:) XIII Sympozjum Wymiany Ciepła i Masy Darłówek 2007, t. 2, s.665-681, Koszalin.

Leszczyńska-Domańska i in. b.d., Leszczyńska-Domańska M., Domański R., Fałtyn M., Kuta J., Olszewski P., Owczarek M., *Badanie systemu do redukcji zmian temperatury nawierzchni mostu (wiaduktu) w cyklach sezonowych i dziennych przez akumulację energii słonecznej z jego powierzchni w gruncie*, Projekt Badawczy Nr N51201631/1761.

Leszczyńska-Domańska M., Domański R., 2009, *Badanie systemu do redukcji zmian temperatury nawierzchni mostu (wiaduktu) w cyklach sezonowych i dziennych przez akumulację energii słonecznej z jego powierzchni w gruncie (Część I)*, „MAZOWSZE Studia Regionalne”, nr 2, s. 113-134.

Liu X., Rees S.J. and Spitler J.D., 2003, *Simulation of a geothermal bridge deck anti-icing system and experimental validation*, (w:) Proc. of the Transportation Research Board 82nd Annu. Mtg., Washington, D.C.

Liu X. and Spitler J.D., 2004, *A simulation tool for the design of the hydronic bridge snow melting system*, (w:) Proc. of the 12th Int. Road Weather Conf., Bingen (on Rhine), Germany.

Morita K., Tago M., 2000, *Operational characteristics of the Gaia Snow-Melting system in Ninohe, Iwate, Japan*, (w:) Proceedings of the World Geothermal Congress 2000.

Olszewski P., 2006, *Analiza pracy długoterminowego, gruntowego magazynu energii z regeneracją sezonową*, Rozprawa Doktorska, WPW, Warszawa.

Owczarek M., 2008, *Pole temperatury i bilanse ciepła konstrukcji mostowej w procesach absorpcji, magazynowania i odzysku energii promieniowania słonecznego*, Rozprawa Doktorska napisana pod kierunkiem prof. R. Domańskiego, WPW, Warszawa.

Owczarek M., Domański R., 2008, *Snow melting on road pavement using solar energy, SOLPOL 2008*, (w:) *International Conference Renewable Energy Innovative Technologies and New Ideas*.

Szargut J. i in., 1992, *Modelowanie numeryczne pól temperatury*, Warszawa.

Takahashi H., Uemoto T., 2004, *Update of geothermal heat pump use in Japan* (w:) *Proceedings of the 6th Asian Geothermal Symposium, Oct. 26-29, 2004*.

Wiśniewski S., Wiśniewski T.S., 2000, *Wymiana ciepła*, Warszawa.

Zwarycz K., Nowak W., 2002, *Various mathematical models of heat transfer process in ground energy storage*, (w:) *Futurestock'2003, 9th International Conference on Thermal Energy Storage*, Warszawa.

---

#### ABSTRACT

The scope of the second part of this paper is to present the results of study on ground heat exchangers cooperating with heat exchanger placed within bridge surface. This type of technical solution was designed in order to reduce road surface short and long term temperature differences. Solar energy acquired from bridge surface was accumulated in ground. The system proposed in this paper was estimated in different constructional terms, heat exchanger configuration and processes conditions. Numerical simulation results for loading and unloading cycles have been presented. Moreover amount of energy accumulated in ground was calculated for different ambient conditions and heat exchanger geometry. The results confirm that the proposed system can reduce temperature differences in the bridge surface.

---

---

**dr inż. Małgorzata Leszczyńska-Domańska**, prof. Wyższej Szkoły Techniczno-Ekonomicznej w Warszawie, dziekan Wydziału Informatyki w Wyższej Szkole Techniczno-Ekonomicznej w Warszawie, adiunkt na Wydziale Transportu Politechniki Warszawskiej  
**prof. dr hab. inż. Roman Domański**, profesor zwyczajny na Wydziale Mechaniki Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej, profesor zwyczajny w Wyższej Szkole Techniczno-Ekonomicznej w Warszawie, przewodniczący Rady Naukowej Instytutu Lotnictwa.