

KRZYSZTOF NEUPAUER, ANETA GŁUSZEK, JANUSZ MAGIERA¹

STRATY AKUMULACJI CIEPŁA W HYBRYDOWEJ INSTALACJI GRZEWOCZEJ Z ODNAWIALNYMI ŹRÓDŁAMI ENERGII

HEAT ACCUMULATION LOSS IN A HYBRID HEATING SYSTEM WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES

Streszczenie

Praca obejmuje badania cieplne solarnego zasobnika magazynującego ciepło w funkcji czasu. Straty ciepła przez przegrody zasobnika zostały oszacowane na drodze analitycznej, tj. wg zasad inżynierii cieplnej przy założeniu konwekcji naturalnej wewnątrz zasobnika. Obliczenia strat ciepła zostały wykonane w oparciu o trzy modele matematyczne, a otrzymane wyniki zostały porównane z danymi doświadczalnymi.

Słowa kluczowe: słoneczne instalacje grzewcze, magazynowanie energii cieplnej, hybrydowe instalacje grzewcze

Abstract

The study of a solar water storage tank as a function of time has been presented. Heat loss through the compartments of the tank has been estimated in an analytical way, i.e. according to the rules of thermal engineering, with the assumption of natural convection inside the storage tank. Heat loss calculations have been made on the basis of three mathematical models, and the results have been compared with experimental data.

Keywords: solar thermal installations, thermal energy storage, hybrid heating systems

¹ Mgr inż. Krzysztof Neupauer, dr inż. Aneta Głuszek, prof. dr hab. inż. Janusz Magiera, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

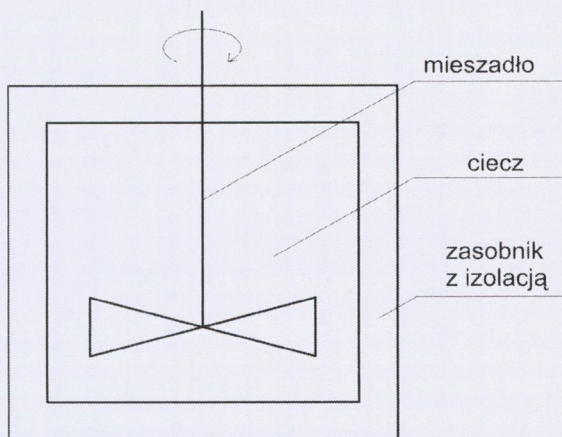
Systemy hybrydowe, w których energia cieplna wytwarzana jest w dużej części ze źródeł odnawialnych, są obecnie coraz bardziej popularne i poszukiwane. Najczęściej wykorzystywanymi źródłami w takich systemach są kolektory słoneczne, kotły opalane biomasą, a także pompy ciepła. Źródła te dostarczają tzw. „zieloną energię” w ilościach, które mogą nawet w pełni zaspokoić potrzeby energii cieplnej zarówno małych gospodarstw domowych, jak również większych obiektów. W celu maksymalnego wykorzystania potencjału kolektorów słonecznych, w instalacjach hybrydowych stosuje się zazwyczaj większe zasobniki ciepła niż w instalacjach tradycyjnych. Zwiększa to stopień wykorzystania zmiennego w czasie strumienia energii słonecznej, zmniejsza jednak wartość maksymalnie uzyskiwanej temperatury wody w zasobniku solarnym. Podstawą do zapewnienia komfortu ciepłej wody użytkowej (CWU) będzie zatem właściwy dobór zasobnika magazynowego oraz ograniczenie do minimum strat ciepła. Zmniejszenie pojemności zasobnika prowadzi do wzrostu temperatury wody ogrzewanej przez instalację solarną powoduje natomiast spadek efektywności pracy takiej instalacji.

W instalacjach hybrydowych stosowany jest zazwyczaj zasobnik solarny składający się z dwóch stref grzewczych: górnej, która stanowi ok. 1/3 pojemności i dolnej stanowiącej ok. 2/3 pełnej objętości zasobnika. Górna część jest ogrzewana za pomocą kominka z płaszczem wodnym lub konwencjonalnie, tj. elektrycznie lub za pomocą kotła centralnego ogrzewania (CO), dolna za pomocą energii słonecznej. Takie rozwiązanie wynika ze stratyfikacji temperatury. Zjawisko to, zwane też uwarstwieniem temperaturowym, polega na tym, że woda chłodniejsza o większej gęstości zbiera się w dolnej części zasobnika, natomiast cieplejsza gromadzi się w górnych warstwach, z tego powodu warstwy wody nie ulegają wymieszaniu. W górnej części zbiornika instalowany jest odpływ CWU do użytkownika. Zjawisko uwarstwienia ciepła jest korzystne. Użytkownik może odbierać wodę o wyższej temperaturze przy tej samej ilości energii zmagazynowanej w zbiorniku [1]. Zasobnik, w którym występuje stratyfikacja temperaturowa dysponuje energią cieplną o około 37% większą niż taki sam zasobnik bez stratyfikacji, tj. z całkowitym wymieszanym cieczy [2]. Sposób zasilania zasobnika wodą zimną wpływa na efektywność rozbioru ciepłej wody z zasobnika oraz odbioru energii cieplnej z kolektorów słonecznych. Do kolektorów podawany jest wtedy czynnik solarny o niższej temperaturze, co zwiększa siłę napędową procesu wymiany ciepła i przyczynia się do zmniejszenia strat energii.

2. Modele obliczeniowe

2.1. Zasobnik z całkowitym wymieszaniami

W zbiorniku magazynującym ciecz o temperaturze wyższej niż temperatura otoczenia zwykle występuje zjawisko rozwarstwienia płynu na obszary o różnych stanach cieplnych. Matematyczny opis takiego układu jest trudny, dlatego czasem stosuje się uproszczenie zakładające pełne wymieszanie cieczy wewnątrz zasobnika (rys. 1).



Rys. 1. Model zasobnika z pełnym wymieszaniem cieczy

Fig. 1. Complete mixing model for liquid in the storage tank

Rozwiązanie takiego problemu należy zacząć od dwóch równań (1) i (2) bilansujących ilość traconego ciepła:

$$dQ = U \cdot A \cdot (T_A - T) d\tau \quad (1)$$

$$dQ = m \cdot c_p \cdot dT \quad (2)$$

Porównując zależności (1) i (2) otrzymuje się równanie (3):

$$m \cdot c_p \cdot \left(\frac{dT}{d\tau} \right) = -U \cdot A \cdot (T - T_A) \quad (3)$$

Szukana jest zależność temperatury cieczy w zasobniku od czasu chłodzenia. Po dalszym przekształceniu otrzymuje się (4):

$$\int_{T_p}^{T_k} \frac{dT}{(T - T_A)} = -\frac{U \cdot A}{m \cdot c_p} \int_0^{\tau} d\tau \quad (4)$$

i po scałkowaniu (5):

$$\ln \left(\frac{T_k - T_A}{T_p - T_A} \right) = -\frac{U \cdot A \cdot \tau}{m \cdot c_p} \quad (5)$$

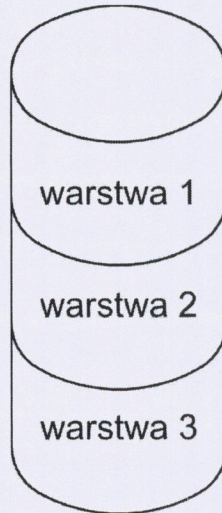
stąd

$$T_k = T_A + (T_p - T_A) \cdot e^{\frac{-U \cdot A \cdot \tau}{m \cdot c_p}} \quad (6)$$

W efekcie otrzymuje się równanie (6), pozwalające obliczyć temperaturę końcową wody T_k po upływie czasu τ , przy założeniu, że woda w zaizolowanym zbiorniku z całkowitym wymieszaniem ochładza się w stałej temperaturze otoczenia. Temperatura początkowa wody wynosi T_p . Zależność (6) wymaga przyjęcia średniej wartości współczynnika przenikania ciepła U dla całej powierzchni zasobnika. W celu zwiększenia dokładności obliczeń, współczynnik ten wyznacza się jako średnią ważoną powierzchni walcowej, dolnej i górnej dennicy proporcjonalnie do ich powierzchni.

2.2. Trzy warstwy niezależne

Zasobnik wykorzystany do badań wyposażony jest tylko w trzy punkty pomiaru temperatury, dlatego model obliczeniowy z warstwami niezależnymi zakłada, że zasobnik podzielony jest na trzy warstwy zgodnie z rys. 2. Każda z trzech warstw posiada taką samą objętość, jednak ich powierzchnie wymiany ciepła z otoczeniem są różne. Warstwy dolna i górna oddają ciepło przez dennicę oraz ścianę cylindryczną. Warstwa środkowa wymienia ciepło z otoczeniem wyłącznie poprzez przegrodę cylindryczną. Założono, że warstwy nie wymieniają ciepła pomiędzy sobą, a jedynie przez przegrody zasobnika, różnica temperatur występuje wyłącznie w pionowej osi zasobnika, a w obrębie każdej warstwy występuje całkowite wymieszanie cieczy.



Rys. 2. Model zasobnika ciepła z trzema niezależnymi warstwami cieczy

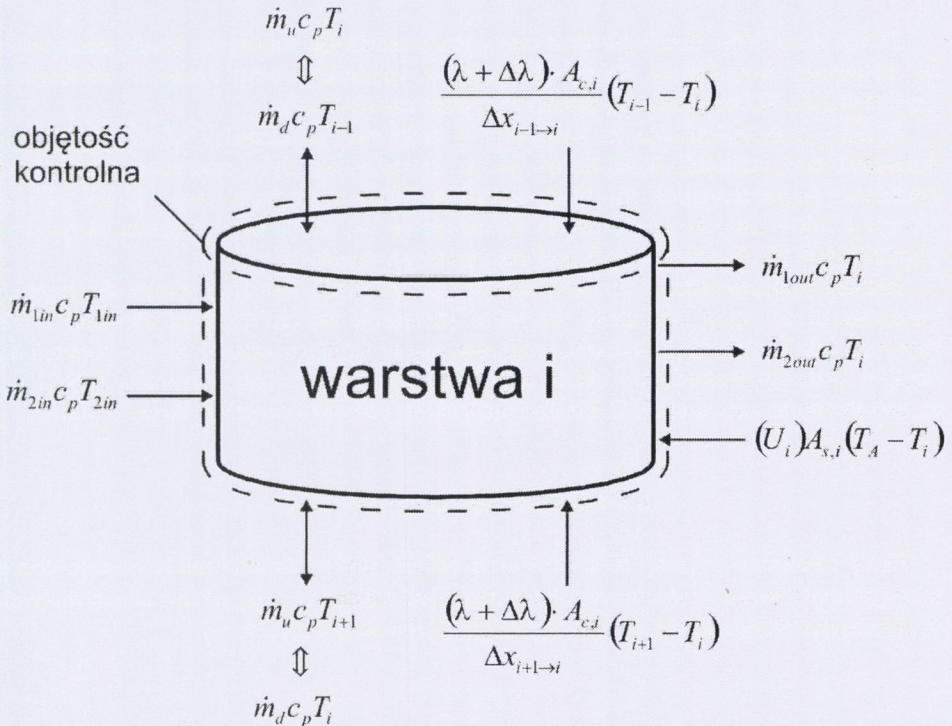
Fig. 2. Heat-transfer model with three independent layers of liquid in the storage tank

Dokładność symulacji zależy od ilości danych, w szczególności od ilości czujników temperatury. Każdy czujnik zbiera dane pomiarowe dla jednej warstwy obliczeniowej.

2.3. Trzy warstwy zależne

Bilans ciepła dla modelu obliczeniowego z trzema warstwami zależnymi uwzględnia straty ciepła do otoczenia oraz relacje warstw sąsiadujących ze sobą. Zgodnie z rys. 3 każda warstwa rozpatrywana jest osobno, a w obszarze każdej z nich zakłada się pełne wymieszanie cieczy. Równanie bilansowe dla i -tej warstwy można zapisać jako (7):

$$\begin{aligned}
 m_i \cdot c_p \cdot \frac{dT_i}{d\tau} = & \frac{(\lambda + \Delta\lambda) \cdot A_{c,i}}{\Delta x_{i \rightarrow i-1}} (T_{i-1} - T_i) + \frac{(\lambda + \Delta\lambda) \cdot A_{c,i}}{\Delta x_{i-1 \rightarrow i}} (T_{i-1} - T_i) + \\
 & + (U_i) A_{s,i} (T_A - T_i) + \dot{m}_d c_p (T_{i-1}) - \dot{m}_u c_p (T_i) - \\
 & - \dot{m}_d c_p (T_i) + \dot{m}_u c_p (T_{i+1}) + \dot{m}_{in} c_p (T_{1in}) - \dot{m}_{out} c_p (T_i) + \dot{m}_{2in} c_p (T_{2in}) - \dot{m}_{2out} c_p (T_i)
 \end{aligned} \quad (7)$$



Rys. 3. Objętość kontrolna definiująca przepływ ciepła

Fig. 3. Control volume which defines the heat flow

Temperatura danej warstwy zależy od temperatury otaczających ją warstw oraz od temperatury otoczenia. Średnią utratę ciepła dla każdej warstwy oraz dla całego zasobnika można obliczyć z równania (7). Współczynnik przenikania ciepła U oblicza się na podstawie równań inżynierii cieplnej[3]. Jeżeli nie ma dopływu ani odpływu cieczy z zasobnika, równanie (7) redukuje się do postaci (8):

$$m_i \cdot c_p \cdot \frac{dT_i}{dt} = \frac{(\lambda + \Delta\lambda) \cdot A_{c,i}}{\Delta x_{i+1-w}} (T_{i+1} - T_i) + \frac{(\lambda + \Delta\lambda) \cdot A_{c,i}}{\Delta x_{i-1-w}} (T_{i-1} - T_i) + (U_i) A_{s,i} (T_a - T_i) \quad (8)$$

Równanie (8) zostało wykorzystane do wyznaczenia temperatury stygnięcia wody w izolowanym zasobniku, współpracującym z instalacją solarną, w czasie gdy kolektory słoneczne, ani żadne inne dodatkowe źródło nie dostarczały ciepła do zasobnika.

3. Opis stanowiska badawczego i sposobu prowadzenia badań

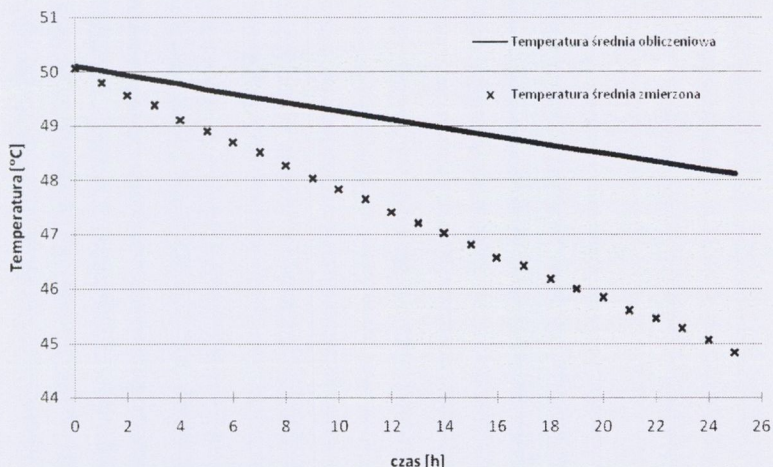
Celem pracy było określenie strat ciepłych z zasobnika solarnego, sprowadzające się do obliczenia temperatury końcowej wody w zasobniku, przy znanych wartościach początkowych. Wartościami odniesienia były dane doświadczalne.

Badania przeprowadzono na zasobniku o całkowitej pojemności 0,5 m³ pracującym w rzeczywistej instalacji hybrydowej [4,5]. Temperatury były mierzone za pomocą czujników rezystancyjnych PT-1000, pierwszej klasy dokładności wg PN-EN 60751. Odczyt i zapis danych pomiarowych dokonywany był za pomocą systemu sterowania DigiENERGY[6].-Programowalny interwał czasowy wynosił 450 s.

Badania przeprowadzano w taki sposób, że zasobnik był nagrzewany do zadanej temperatury, po czym odłączano wszystkie strumienie energii cieplnej zarówno te na dopływie jak i odpływie. Zasobnik znajdował się w pomieszczeniu o dużej pojemności cieplnej. Podczas prowadzenia badań, temperatura w pomieszczeniu wynosiła 27°C i nie ulegała zmianom więcej niż 1°C. Pomiar temperatury prowadzono przez okres 25 godzin.

4. Otrzymane wyniki i ich analiza

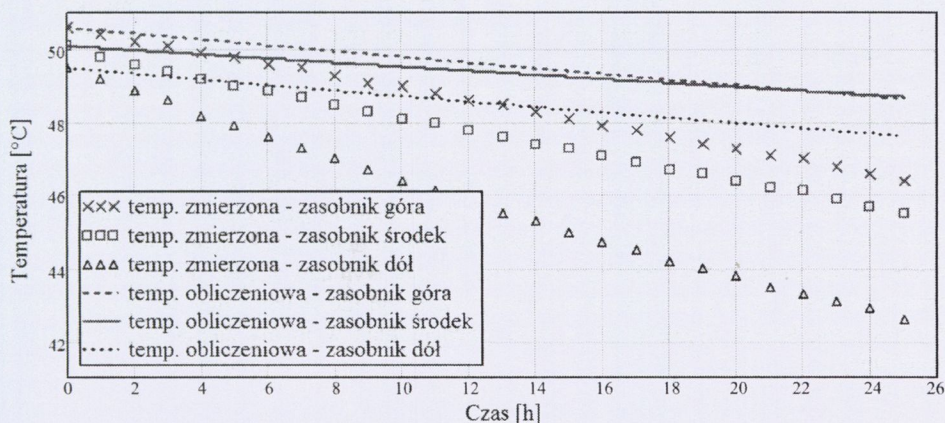
Przeprowadzone w pracy obliczenia oraz badania doświadczalne miały na celu ocenę wiarygodności metod obliczeniowych i stopnia ich zgodności z wynikami rzeczywistymi. Wyniki badań doświadczalnych i teoretycznych porównano na rys. 4 ÷ 6.



Rys. 4. Zmiana temperatury wody w zasobniku z całkowitym wymieszczeniem

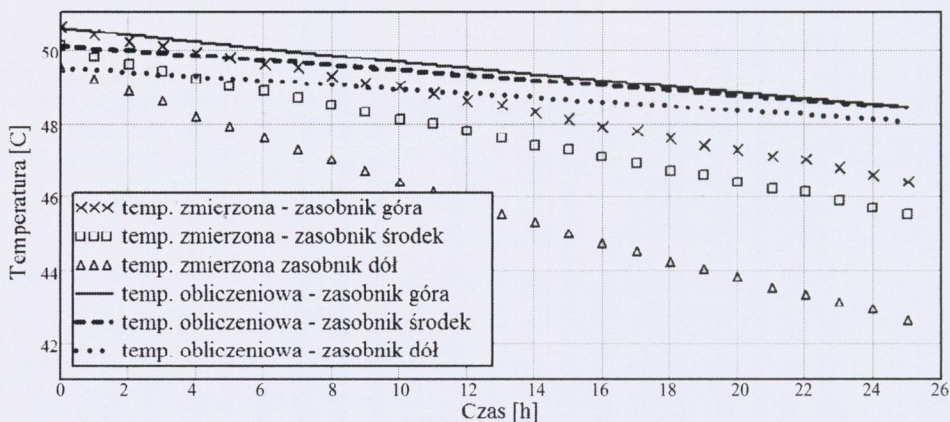
Fig. 4. Change of the water temperature in the tank with complete mixing

Założenie całkowitego wymieszania i stałej temperatury wody w całej objętości (rys. 4) dało wynik obarczony błędem względnym około 62%. Jako konfigurację podstawową (odniesienia) przyjęto doświadczalne dane spadku temperatury. Kolejne rozwiązanie, wg tzw. modelu sekcyjnego o parametrach skupionych, zakładające występowanie trzech niezależnych warstw cieczy (rys. 5) okazało się mniej dokładne. Średnia obliczeniowa utrata ciepła w tym przypadku różniła się od wyników rzeczywistych o 66%. Względny błąd obliczeniowy był najmniejszy dla pierwszej, tj. górnej warstwy i wyniósł około 54%.



Rys. 5. Zmiana temperatury wody w zasobniku z trzema warstwami niezależnymi

Fig. 5. Change of the water temperature in the tank with three independent layers



Rys. 6. Zmiana temperatury wody w zasobniku z trzema warstwami zależnymi

Fig. 6. Change of the water temperature in the tank with three dependent layers

Wprowadzenie zależności pomiędzy warstwami cieczy (rys. 6) spowodowało, że średni wynik poprawił się o ok. 2% w porównaniu do wyników obliczeniowych, gdy warstwy traktowano jako niezależne od siebie elementy.

W każdym z trzech przyjętych modeli, obliczeniowe straty ciepła po 25-godzinach są mniejsze niż wynika z danych pomiarowych.

Analizując wykresy na rys. 5 i 6 można doszukiwać się pewnego podobieństwa wyników obliczeniowych i doświadczalnych. Pomimo znacznych błędów procentowych, stosunki różnic temperatur końcowych pomiędzy warstwami zasobnika, górną i dolną, są do siebie zbliżone. Można zatem wnioskować, że istnieje co najmniej jeden czynnik, który nie został uwzględniony w obliczeniach. Czynnik ten musi mieć bardzo duży wpływ na wyniki obliczeń symulacyjnych dla warstwy środkowej i dolnej, a jego pominięcie skutkuje największym błędem właśnie w tych warstwach. Pomimo, że warunki brzegowe są takie same, w rzeczywistości dolna warstwa prezentuje inny przebieg zmian cieplnych. Zbiornik doświadczalny posiada elementy, których istnienie zostało pominięte we wszystkich obliczeniach, są to np. króćce odprowadzane od metalowej ścianki konstrukcyjnej w ilości kilkunastu sztuk. W miejscach tych ciepło może przenikać znacznie szybciej niż w przypadku dokładnie izolowanej ścianki. Dodatkowo dolna denница jest uzbrojona w metalowy stojak cylindryczny, który także przyspiesza proces wymiany ciepła. Ponadto, do celów obliczeniowych, bryła zasobnika została przybliżona do idealnego walca. W rzeczywistości dennice mają kształt elipsoidalny, a więc powierzchnia wymiany ciepła jest większa od zakładanej.

5. Podsumowanie

Pomiary rzeczywistych temperatury potwierdziły zmienny rozkład ciepła wzdłuż osi pionowej zasobnika, spowodowany zmianą gęstości wody. W zasobniku występuje więc stratyfikacja cieplna. Pionowy rozkład temperatury wody sprawdzano przez czas 25 godzin, a zebrane wyniki doświadczalne posłużyły jako odniesienie do wyników obliczeniowych.

Straty ciepła uzyskane drogą symulacji komputerowej, wg trzech różnych modeli obliczeniowych, są mniejsze od rzeczywistych strat ciepła. Najbardziej prawdopodobną przyczyną tych rozbieżności jest pominięcie różnego rodzaju strat cieplnych w modelach teoretycznych. Chłodzenie cieczy wiąże się ze zmniejszeniem jej objętości, więc różnicę tę będzie wypełniała zimna woda zasilająca zbiornik. Badany zasobnik przez cały czas był fizycznie połączony z instalacją, a więc możliwy był dopływ bieżącej wody zimnej. W rezultacie do symulacji należałoby wprowadzić więcej czynników i przeanalizować otrzymane wyniki. Kontynuacją badania mogłoby być znalezienie i wprowadzenie do zastosowanych obliczeń tzw. nastawnego parametru modelu, co doprowadziłoby do zwiększenia dokładności wyników symulacyjnych.

Oznaczenia

A	– powierzchnia ścian zbiornika	[m ²]
$A_{c,i}/A_{s,i}$	– powierzchnia przekroju poprzecznego/powierzchnia zewnętrzna i -tej warstwy	[m ²]
c_p	– ciepło właściwe wody	[J/kg·K]
m	– masa cieczy w zasobniku	[kg]
\dot{m}_u / \dot{m}_d	– masowe natężenie przepływu wody w górę/w dół zasobnika	[kg/s]
$\dot{m}_{1in}, \dot{m}_{1out}$	– masowe natężenia przepływu cieczy dopływającej i odpływającej do warstwy	[kg/s]
$\dot{m}_{2in}, \dot{m}_{2out}$		
Q	– strumień ciepła traconego	[J]
T	– temperatura wody w zasobniku	[°C]
T_A	– temperatura otoczenia	[°C]
T_{i-1}, T_i, T_{i+1}	– temperatura warstwy poniżej, warstwy „ i ”, warstwy powyżej,	
T_{1in}, T_{2in}	– cieczy dopływającej 1, cieczy dopływającej 2	[°C]
T_k	– temperatura końcowa wody	[°C]
T_p	– temperatura początkowa wody	[°C]
U	– współczynnik przenikania ciepła	[W/m ² ·K]
U_i	– współczynnik przenikania ciepła z i -tej warstwy do otoczenia	[W/m ² ·K]

$\Delta x_{i+1 \rightarrow i}, \Delta x_{i-1 \rightarrow i}$	– odległość pomiędzy warstwą „i” a warstwą poniżej/powyżej,	[m]
$\lambda / \Delta \lambda$	– współczynnik przewodzenia ciepła/poprawka uwzględniająca przewodzenie przez ścianki zbiornika oraz mieszanie się cieczy na styku warstw	[W/m·K]
τ	– czas	[s]

Literatura

- [1] Cruickshank C. A., Harrison S. J.: *Energy and Buildings*, 42, (2010), 1703-1710.
- [2] Hollands K. G. T., Lightstone M. F., *Solar Energy* 43, (2), (1989), 97-105.
- [3] T. Hobler, *Ruch ciepła i wymienniki*, WNT Warszawa 1968.
- [4] Neupauer K., Głuszek A., Magiera J.: *Inżynieria procesowa w ochronie środowiska*, Wydawnictwo i Drukarnia Świętego Krzyża, Opole 2009.
- [5] Neupauer K., Głuszek A., Magiera J.: *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 49 (3), (2010), 87-88.
- [6] Neupauer K.: 18th International Conference Process Engineering and Chemical Plant Design, Materiały konferencyjne, Berlin 2011.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki, nr. rej. N N209 758240