

Sebastian CHAMERA, Igor MACIEJEWSKI, Tomasz KRZYŻYŃSKI

POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, INSTYTUT MECHATRONIKI, NANOTECHNOLOGII I TECHNIKI PRÓŻNIOWEJ

Identyfikacja parametryczna modelu ogrzewacza wody**Dr inż. Sebastian CHAMERA**

Doktor nauk technicznych, asystent zatrudniony w Instytucie Mechatroniki, Nanotechnologii i Techniki Próżniowej Politechniki Koszalińskiej; obecnie zajmuje się badaniem układów ogrzewania wody o małej mocy elektrycznej; współautor kilku publikacji w międzynarodowych i krajowych czasopismach z zakresu mechatroniki.



e-mail: sebastian.chamera@tu.koszalin.pl

Dr inż. Igor MACIEJEWSKI

Doktor nauk technicznych, adiunkt zatrudniony w Instytucie Mechatroniki, Nanotechnologii i Techniki Próżniowej Politechniki Koszalińskiej; od 8 lat zajmuje się badaniem układów wibroizolacji do ochrony operatorów maszyn roboczych przed drganiami; autor lub współautor kilkunastu publikacji w międzynarodowych i krajowych czasopismach z zakresu mechatroniki.



e-mail: igor.maciejewski@tu.koszalin.pl

Prof. dr hab. inż. Tomasz KRZYŻYŃSKI

Absolwent Politechniki Warszawskiej; stopień doktora nauk technicznych w zakresie mechaniki technicznej i doktora habilitowanego w zakresie budowy i eksploatacji maszyn uzyskał w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk. Tytuł profesora otrzymał w październiku 2006 r. Kieruje Zakładem Mechatroniki i Mechaniki Stosowanej w Instytucie Mechatroniki, Nanotechnologii i Techniki Próżniowej Politechniki Koszalińskiej. Funkcję rektora Politechniki Koszalińskiej pełni od 2005 r.



e-mail: tomasz.krzyzynski@tu.koszalin.pl

1. Wprowadzenie

Ogrzewanie pojemnościowe wody ma głównie zastosowanie w tych budynkach mieszkalnych i pomieszczeniach, gdzie instalacja elektryczna nie pozwala na zbyt duże obciążenie prądowe. Ogrzewacze pojemnościowe wody, ze względu na swoją stosunkowo niewielką moc (zwykle od 1500 do 2000 W), mogą być wykorzystywane w takich obiektach. Inną zaletą tego typu ogrzewania jest dostępność ciepłej wody, praktycznie niezależnie od wielkości przepływu, gdyż w podgrzewaczach przepływowych wielkość ta wpływa na temperaturę wylotową wody. Istnieje jedynie ograniczenie w postaci skończonej pojemności zbiornika. Podstawową wadą ogrzewania pojemnościowego są natomiast straty energii elektrycznej, wykorzystanej na podtrzymanie w ogrzewaczu zadanej temperatury wody. Straty te zależą w dużej mierze od jakości izolacji termicznej zbiornika. Najczęściej do izolacji zbiorników ogrzewaczy pojemnościowych wykorzystuje się pianki poliuretanowe, bądź styropian. Izolacja taka tworzy wraz z materiałem zbiornika i materiałem obudowy ściankę wielowarstwową, przez którą przenika ciepło do otoczenia. Proces przenikania ciepła składa się z trzech zasadniczych składowych: przejmowania ciepła przez ściankę wewnątrz zbiornika, przewodzenia ciepła przez trzy kolejne warstwy izolacyjne (materiał zbiornika, izolację właściwą, materiał obudowy), oraz przejmowania ciepła od ścianki obudowy do otaczającego powietrza. Proces przenikania ciepła zilustrowano na rys. 1 [1, 2]. W procesie wymiany ciepła uwzględnić należy także promieniowanie ciepła z powierzchni obudowy do otoczenia. Wymiana ciepła w materiale izolacyjnym jest zagadnieniem bardzo złożonym i nie w pełni poznany, zależy od bardzo wielu czynników, między innymi porowatości materiału, jego grubości optycznej, czy stanu zawilgocenia [2]. Dlatego też w przedstawionym przypadku założono, iż wymiana ciepła odbywa się przez przenikanie ciepła przez ściankę wielowarstwową oraz promieniowanie z powierzchni zewnętrznej.

Streszczenie

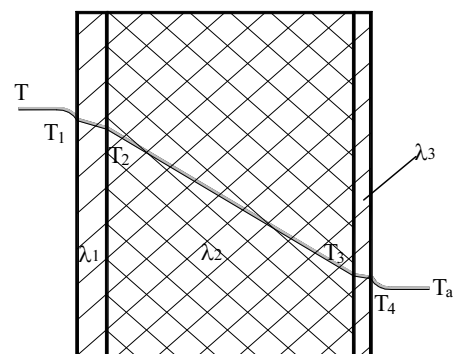
W pracy przedstawiono analizę modelu fizycznego i matematycznego pojemnościowego ogrzewacza wody. Rozwiązanie modelu matematycznego zostało porównane z wynikami badań eksperymentalnych. Za pomocą aproksymacji wyników badań eksperymentalnych otrzymano wartości współczynników przenikania ciepła dla ogrzewaczy o dwu różnych pojemnościach. Badania tego typu pozwalają na określenie efektywności energetycznej dowolnego ogrzewacza pojemnościowego, gdyż wartość współczynnika przenikania ciepła stanowi o jakości termoizolacji zbiornika z ciepłą wodą użytkową.

Słowa kluczowe: wymiana ciepła, pojemnościowe ogrzewacze wody, zużycie energii.

Parametric identification of storage water heater model**Abstract**

The paper presents physical and mathematical model of a storage water heater. Typical structure of storage water heater is also included in the article (Chapter 2, Fig.1). The analytical solution of mathematical model was compared with results of an experimental research. With the help of an approximation of experimental results, values of heat transmission coefficients for two different size storage water heaters were received. Such investigations allow to specify the energy effectiveness for any storage water system, because the heat transmission coefficient value determines the thermal insulation quality of a tank filled with a warm drinking water. Due to growing a global power demand, it is necessary to select such devices, which losses of energy are as low as possible. Nevertheless, the proposed methodology can't be used for evaluating the heat transmission coefficient of any storage water system only in the basis of the computer simulation results. Many structures of the storage water systems are characterized by different system parameters, such as: the thickness of isolation layer, the material of isolation layer, the thickness and material of chamber walls, the material of storage water enclosure, etc. Therefore the numerical investigations have to be performed together with the experimental researches in order to identify the system parameters for different structures of the storage water systems.

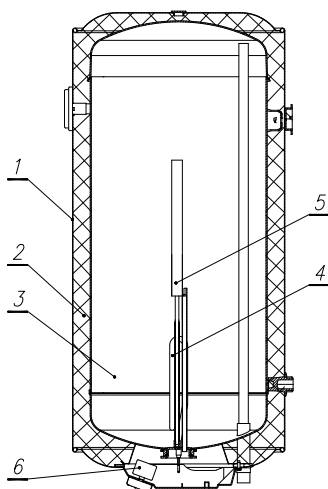
Keywords: heat exchange, storage water heaters, energy consumption.



Rys. 1. Rozkład temperatury w płaskiej ściance wielowarstwowej
Fig. 1. Temperature distribution in flat multilayer wall

2. Budowa ogrzewacza pojemnościowego

Na rys. 2 przedstawiono budowę typowego ogrzewacza pojemnościowego wody. Obudowa 1 stanowi część zewnętrzną urządzenia i jednocześnie zabezpiecza przed przypadkowym kontaktem z częściami będącymi pod napięciem. Pianka poliuretanowa 2 stanowi izolację zbiornika. Grzałka 4 umieszczona w dolnej części zbiornika jest źródłem ciepła dla ogrzewanej wody. Wyróżnić należy tutaj także element 5 – anodę magnezową, której zadaniem jest zabezpieczenie wnętrza stalowego, emaliowanego zbiornika przed korozją. Temperaturę wody w zbiorniku nastawia się za pomocą termostatu 6. Wartość histerezy, czyli różnicy między temperaturą wyłączenia a temperaturą ponownego włączenia termostatu jest różna w zależności od producenta i waha się w granicach 2-6°C. Tak zbudowane ogrzewacze używane są zwykle w dość szerokim przedziale pojemności: od około 20 litrów, do 120 (150) litrów, w zależności od zapotrzebowania na ciepłą wodę danego budynku mieszkalnego, gospodarczego, pomieszczenia itp. Należy również dodać, iż tego typu ogrzewacze są tak zwane ogrzewacze zamknięte, to znaczy pracują pod ciśnieniem sieci wodociągowej i mogą zaopatrywać w ciepłą wodę jednocześnie kilka punktów poboru.



Rys. 2. Budowa pojemnościowego ogrzewacza wody
Fig. 2. Storage water heater structure

3. Model fizyczny i matematyczny ogrzewacza

W modelu przyjęto następujące założenia: woda w zbiorniku ogrzewacza nie ulega wrzeniu ani zamarzaniu, układ pracuje w zakresie temperatur od 10 do 85°C, występuje zjawisko wymiany ciepła przez przejmowanie i przewodzenie. Uproszczeniami w modelu są: stała wartość współczynnika przenikania ciepła, niezależnie od temperatury, stała moc grzałki, stała gęstość wody i stałe ciepło właściwe, niezależnie od temperatury, stała (niezmienna w czasie i przestrzeni) temperatura powierzchni zewnętrznej ogrzewacza. Przyjęto również objętość wody jako układ dyskretny, wykorzystując do opisu zmiany temperatury równanie różniczkowe zwyczajne.

Model zmian temperatury wody opisuje następujące równanie [3]:

$$\rho V c \frac{dT}{dt} = P - kA(T - T_a), \quad (1)$$

którego rozwiązaniem jest funkcja:

$$T(t) = (T_0 - T_a)e^{\frac{-kA}{\rho V c}t} + \frac{P}{kA}(1 - e^{\frac{-kA}{\rho V c}t}) + T_a. \quad (2)$$

W przypadku termostatu z histerezą, funkcja P i $w(t)$ przyjmują następującą postać [4]:

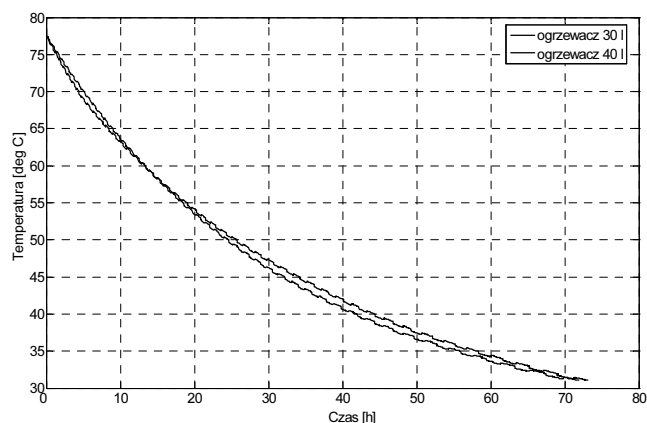
$$P = \frac{P_{grzałki} + w(t)}{2}$$

$$w(t) = P_{grzałki} \cdot \text{sign}[T(t) - T_{\min} - h + h \cdot \text{sign}(w(t - \Delta t))]. \quad (3)$$

We wzorach (1) – (3) przyjęto następujące oznaczenia: ρ - gęstość wody [kg/m^3], V - objętość wody w zbiorniku ogrzewacza [m^3], c - ciepło właściwe wody [J/kgK], T - temperatura chwilowa wody [K], P - moc grzałki [W], k - współczynnik przenikania ciepła [$\text{W/m}^2\text{K}$], A - całkowita powierzchnia wymiany ciepła między ogrzewaczem a otoczeniem [m^2], T_0 - temperatura początkowa wody w ogrzewaczu przy stygnięciu [K], T_a - temperatura otoczenia [K], T_{\min} - dolna wartość temperatury w histerezie termostatu [K], h - wartość połowy histerezy termostatu [K].

4. Pomiary zmian temperatury w ogrzewaczach

Badaniom spadku temperatury wody w czasie, od chwili ich nagrzania do osiągnięcia temperatury ustalonej poddano ogrzewacze o pojemności 30 i 40 litrów. Wykresy zmian temperatury przedstawiono na rys. 3. Temperatura wody mierzona była z krokiem czasowym 60 s, w osi ogrzewacza i w połowie wysokości zbiornika.



Rys. 3. Przebieg spadku temperatury w ogrzewaczach
Fig. 3. Water cooling inside the heaters, when power is switched off

5. Identyfikacja parametrów modelu

W przypadku stygnięcia wody, jej temperatura w ogrzewaczu zmienia się według zależności (4):

$$T(t) = (T_0 - T_a)e^{\frac{-kA}{\rho V c}t} + T_a, \quad (4)$$

W celu oszacowania nieznanymi parametrów modelu, takich jak współczynniki przenikania ciepła k ogrzewaczy o pojemności 30 i 40 litrów, posłużono się narzędziem programowym Curve Fitting Toolbox pakietu Matlab. Aproxymując wyniki pomiarów eksperymentalnych według zależności (4) wyznaczono nieznany parametr modelu k . Dopasowania rozwiązania modelu matematycznego do wyników pomiarów dokonano minimalizując sumę kwadratów błędów SSE (metoda najmniejszych kwadratów):

$$\min_T SSE(T), \text{ gdzie } SSE = \sum_{i=1}^n (T(t_i) - \hat{T}(t_i))^2 \quad (5)$$

przy czym:

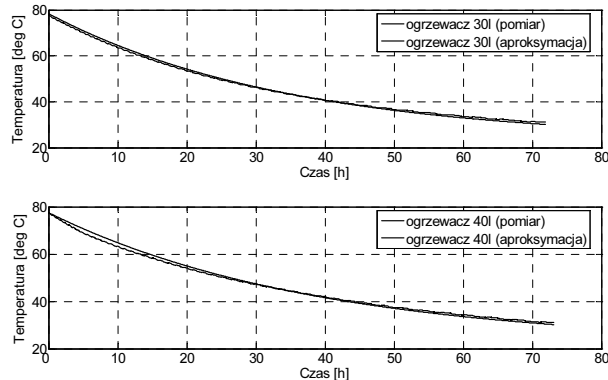
T - wartość temperatury pomierzonej,

\hat{T} - wartość temperatury wynikająca z rozwiązania modelu,

t_i - wartość dyskretnej chwili czasu,

n - liczba punktów pomiarowych.

Przebiegi krzywych stygnięcia w zestawieniu z danymi pomiarowymi zilustrowano na wykresach przedstawionych na rys. 4.



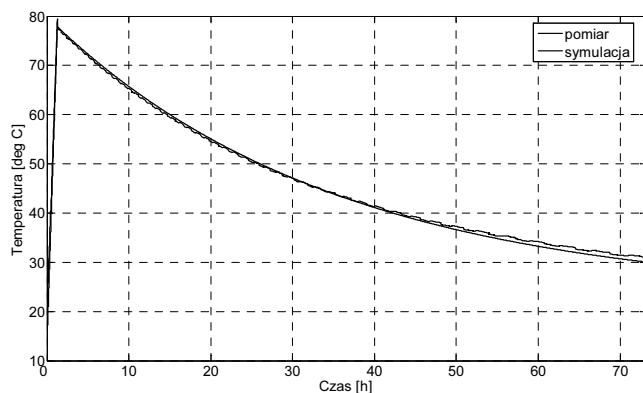
Rys. 4. Porównanie wyników pomiarów oraz aproksymowanego modelu podczas stygnięcia wody w ogrzewaczu

Fig. 4. Comparison of test and simulation results while water cooling

W wyniku obliczeń współczynnika przenikania ciepła otrzymano następujące wartości:

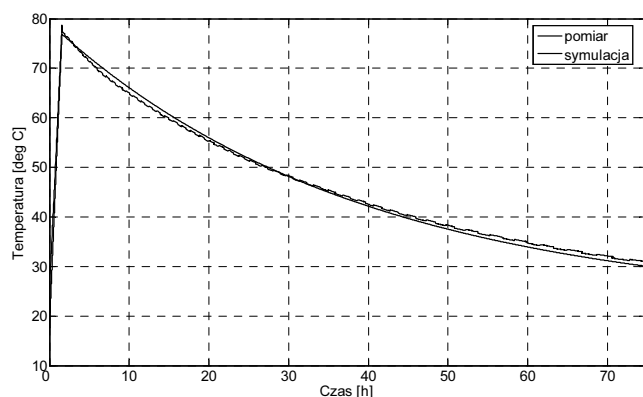
a) dla ogrzewacza o pojemności 30 litrów: $k \approx 1,31$ (W/m^2K)

b) dla ogrzewacza o pojemności 40 litrów: $k \approx 1,29$ (W/m^2K)



Rys. 5. Zestawienie wyników pomiarów i symulacji komputerowej dla ogrzewacza 30 l

Fig. 5. Simulation and test results for 30-liter water heater



Rys. 6. Zestawienie wyników pomiarów i symulacji komputerowej dla ogrzewacza 40 l

Fig. 6. Simulation and test results for 40-liter water heater

Na rys. 5 i 6 przedstawiono przebieg zmian temperatury podczas pełnego cyklu nagrzewania i stygnięcia, przy założonych parametrach modelu ogrzewacza.

6. Podsumowanie i wnioski końcowe

Współczynnik przenikania ciepła k jest najważniejszym z względu na energooszczędność parametrem, opisującym konstrukcję ogrzewacza pojemnościowego. Na jego wartość najbardziej znacząco wpływa jakość izolacji termicznej, którą określa grubość warstwy termoizolacyjnej i jej współczynnik przewodzenia ciepła. Przeprowadzone w niniejszej pracy badania pozwalają na określenie efektywności energetycznej dowolnego ogrzewacza pojemnościowego, przy ustalonych takich parametrach, jak jego pojemność i wymiary gabarytowe. Metody tej nie można jednak wykorzystywać w celu oszacowania współczynnika przenikania ciepła dowolnego ogrzewacza jedynie na drodze symulacji komputerowej. Każda bowiem konstrukcja ogrzewacza charakteryzuje się różnymi parametrami, takimi jak grubość warstwy izolacyjnej, materiał warstwy izolacyjnej, jej współczynnik przewodzenia ciepła, grubość i materiał ścian zbiornika oraz obudowy itd. Parametry te zwykle nie są badającemu znane, istnieje zatem potrzeba przeprowadzenia badań eksperymentalnych w celu wyznaczenia na ich podstawie ogólnego parametru stanowiącego o intensywności wymiany ciepła, jakim jest wyznaczony w pracy współczynnik k . Równanie (4) jest typowym równaniem opisującym równomierne w całej objętości ciała zmiany temperatury. Jednakże zadowalającą zgodność modelu z badaniami eksperymentalnymi można otrzymać jedynie w przypadku zastosowania w równaniu poprawnej wartości współczynnika przenikania ciepła.

Jak wskazują uzyskane wyniki badań, wartości współczynników przenikania ciepła w dwu przypadkach ogrzewaczy tego samego producenta są z punktu widzenia praktyki takie same. Różnica wartości $0,02$ ($W/(m^2K)$) jest wielkością pomijalną i zawiera się w granicach błędów. Świadczy to tym samym o identycznej jakości izolacji, jak i jej grubości. Ze względu na coraz większe zapotrzebowanie energetyczne na świecie, koniecznym staje się dobór takich urządzeń, których dobowe straty energetyczne są jak najmniejsze. Prowadzone badania stanowią część programu zmniejszenia energochłonności urządzeń stosowanych powszechnie w gospodarstwach domowych. W przypadku przedstawionych powyżej urządzeń nie bez znaczenia może okazać się rodzaj obudowy, gdyż przy typowych materiałach stosowanych w konstrukcjach obudów występują znaczne różnice w ich emisyjności ε [5].

7. Literatura

- [1] Wiśniewski S., Wiśniewski T. S.: Wymiana ciepła. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 2000.
- [2] Furmański P., Wiśniewski T. S., Banaszek J.: Izolacje cieplne. Mechanizmy wymiany ciepła, właściwości cieplne i ich pomiary. Instytut Techniki Ciepłej, Politechnika Warszawska, Warszawa 2006.
- [3] Kar A.K., Kar U.: Optimum design and selection of residential storage-type electric water heaters for energy conservation. Energy Convers. Mgmt Vol. 37, No. 9, pp. 1445-1452. Elsevier Science Ltd, 1996.
- [4] Tarnowski W., Bartkiewicz S.: Modelowanie matematyczne i symulacja komputerowa dynamicznych procesów ciągłych. Koszalin 2000.
- [5] Recknagel H., Sprenger E., Honmann W., Schramek E.R.: Poradnik. Ogrzewanie i klimatyzacja. EWFE – Wydanie 1. Gdańsk 1994.