

Sebastian CHAMERA, Igor MACIEJEWSKI, Tomasz KRZYŻYŃSKI
POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, INSTYTUT MECHATRONIKI, NANOTECHNOLOGII I TECHNIKI PRÓŻNIOWEJ
ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin

Optymalizacja konstrukcji pojemnościowego 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 10 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 honoris causa 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

Pojemnościowe ogrzewacze wody są urządzeniami, których głównymi elementami składowymi są:

- zbiornik, w którym znajduje się ogrzewana woda użytkowa,
- element grzejny, zwykle w postaci grzałki elektrycznej,
- izolacja termiczna,
- obudowa.

Służą one do ogrzania określonej objętości wody (zależnie od wielkości urządzenia), oraz magazynowania w zbiorniku już ogrzanej wody, z możliwie jak najmniejszymi stratami ciepłymi. Owe straty w dużej mierze zależą od materiału izolacji, jakości izolacji, warunków otoczenia. Materiały izolacyjne posiadają zróżnicowane właściwości termoizolacyjne i to w dużej mierze stanowi o energooszczędności pojemnościowego ogrzewacza wody (bojlera). Najbardziej rozpowszechnionym materiałem, stosowanym w termoizolacji bojlery są pianki poliuretanowe (PUR) oraz styropiany. Podstawowe własności fizykomechaniczne tych materiałów zestawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Zestawienie podstawowych własności fizykomechanicznych materiałów termoizolacyjnych, używanych w technice grzewczej

Tab. 1. Fundamental physical and mechanical properties of heat-insulating materials used in heating technique

Lp.	Rodzaj materiału	Gęstość (kg/m ³)	Współczynnik przewodzenia ciepła λ (W/(m·K))
1.	Pianka poliuretanowa PUREX WG-2017NF	25	0,033
2.	Pianka poliuretanowa PUREX WG-2034NF	48	0,029
3.	Pianka poliuretanowa PUREX WG-2732E	42	0,022-0,025
4.	Styropian EPS 100 (038)	17	0,038
5.	Styropian EPS 70 (040)	12	0,040

Pianki poliuretanowe mogą w zależności od typu posiadać różną gęstość i różny współczynnik przewodzenia ciepła. Współczynnik ten zależy między innymi od tego, czy jest to pianka zamknięto-komórkowa, czy otwarto-komórkowa (pory w piance po procesie spienienia pozostają zamknięte, wypełnione gazem, np. CO₂). Również w przypadku styropianów mamy do czynienia z różnymi gęstościami i różnymi współczynnikami przewodzenia ciepła (tab. 1).

2. Sformułowanie problemu optymalizacji

Celem optymalizacji zawartej w niniejszej pracy, jest próba stworzenia konstrukcji pojemnościowego ogrzewacza wody, korzystnej zarówno pod względem własności termoizolacyjnych,

Streszczenie

W artykule przedstawiono optymalizację elementów konstrukcji pojemnościowego ogrzewacza wody. Kryteria optymalizacji to minimalizacja zużycia energii oraz kosztów materiałowych elementów konstrukcyjnych ogrzewacza, decydujących o zużyciu energii. Rozwiązania Pareto-optymalne przedstawione są w postaci punktów, które decydują o wartościach pięciu zmiennych decyzyjnych. Przedstawiony algorytm optymalizacyjny może posłużyć do wspomagania konstruowania optymalnych w sensie kosztów wytworzenia i energooszczędności pojemnościowych urządzeń grzewczych.

Słowa kluczowe: optymalizacja, rozwiązanie Pareto-optymalne, energooszczędność.

Optimization of a storage water heater construction

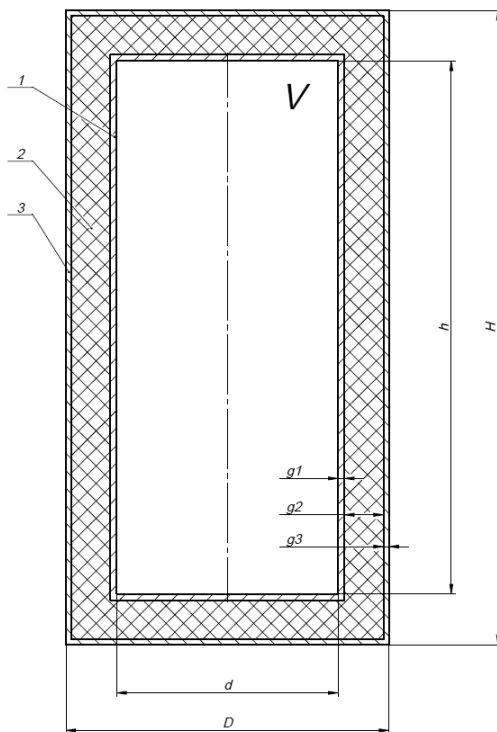
Abstract

The paper presents optimization of elements in a storage water heater construction. Two optimization criteria are taken into account: energy saving and minimum costs of materials, used in the construction of a water heater. The construction elements used in a heater have significant influence on the value of energy consumption. Basic construction elements of the storage water heater are shortly described. Fundamental physical and mechanical properties of selected materials used in a thermal insulation of the heaters are shown. The optimization task is delineated and an object of the optimization is also schematically presented. Additionally, the paper contains a mathematical model of the optimization and a range of decision variables. The Pareto-optimal solution points are calculated. These points decide on the values of five decision variables. When designing the storage water heater appliances, these optimization algorithms can be used to get the optimal material costs and energy saving. The paper is strictly focused on the cost of the materials used, not the cost of the heater manufacturing itself. Additional costs can be added by processing the considered material, for example polyurethane foam or by performing foamed polystyrene molders – properly to heater dimensions. The scale of additional costs surely depends on an output volume and technical capacities of a manufacturing plant – for example the size of machine park. Additional costs related to specific construction materials can be analyzed in other, individual consideration.

Keywords: optimization, Pareto-optimal solution, energy saving.

jak i z punktu widzenia kosztów materiałowych. Koszty te zwykle są odpowiednio większe dla materiałów o lepszych własnościach termoizolacyjnych.

W rozpatrywanym przypadku do dyspozycji są cztery różne materiały termoizolacyjne, które przedstawiono w tabeli 1, w pozycjach 1-4. Ważnym zagadnieniem jest również wielkość przestrzeni, w której będzie pracował bojler. Na potrzeby projektu przyjęto, iż maksymalne wymiary ogrzewacza będą wynosić odpowiednio: $H_{max.}=1\text{m}$ (wysokość maksymalna), oraz $D_{max.}=0,4\text{m}$ (średnica maksymalna). Schemat poglądowy zbiornika z naniesionymi parametrami przyjętymi do optymalizacji przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Rysunek poglądowy z wymiarami charakterystycznymi konstrukcji ogrzewacza. 1 – materiał zbiornika (blacha stalowa), 2 – materiał termoizolacyjny (PUR, styropian), 3 – materiał obudowy zewnętrznej (blacha stalowa)

Fig. 1. Schematic view of a storage water heater construction with characteristic dimensions. 1 – tank material (steel), 2 – heat-insulating material (polyurethane foam or foamed polystyrene), 3 – outer casing material (steel)

Jako zmienne decyzyjne przyjęto: grubość ścianki zbiornika g_1 , grubość materiału termoizolacyjnego g_2 , współczynnik przewodzenia ciepła materiału termoizolacyjnego λ_2 , oraz wielkości H i D (wysokość i średnica bojlera).

3. Model matematyczny optymalizacji

Przyjęto następujące kryteria: a) całkowite kryterium jakości termoizolacji ma dążyć do maksimum, b) koszt materiałowy trzech wyszczególnionych na rys. 1 elementów ogrzewacza ma dążyć do minimum.

W przypadku pierwszego z kryteriów posłużono się krzywą spadku temperatury wody ogrzewanej. Ogrzana woda została poddana stygnięciu przy określonej temperaturze otoczenia. Posłużono się rozwiązaniem równania różniczkowego przedstawionego w pracy [1]. Przyjęto, iż wartość całki pod krzywą spadku temperatury w zbiorniku musi dążyć do maksimum, zatem:

$$\int_0^{\infty} [(T_0 - T_a) e^{\frac{-kt}{\rho V c}} + T_a] dt \Rightarrow \max., \quad (1)$$

gdzie poszczególne symbole oznaczają: T_0 – temperatura początkowa wody w zbiorniku ogrzewacza (K), T_a – temperatura otoczenia (K), k – współczynnik przenikania ciepła ($\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$), A – powierzchnia zewnętrzna wymiany ciepła (m^2), ρ – gęstość wody (kg/m^3), V – pojemność (objętość) zbiornika (m^3), c – ciepło właściwe wody ($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$).

Natomiast współczynnik przenikania ciepła k zdefiniowano następująco [2, 3]:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{g_1}{\lambda_1} + \frac{g_2}{\lambda_2} + \frac{g_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (2)$$

gdzie: α_1 – współczynnik przyjmowania ciepła od wody przez ścianki zbiornika ($\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$), α_2 – współczynnik przyjmowania ciepła od ścianek obudowy ogrzewacza przez otoczenie ($\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$), g_1, g_2, g_3 – grubości ścianek kolejno: zbiornika, termoizolacji, obudowy (m); $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – współczynniki przewodzenia ciepła, kolejno: materiału zbiornika, materiału termoizolacyjnego, materiału obudowy ($\text{W}/(\text{mK})$).

Drugim z kryteriów jest minimalizacja kosztów materiałów, użytych w konstrukcji zbiornika, termoizolacji i obudowy. Można to zapisać jako:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 \Rightarrow \min., \quad (3)$$

gdzie: C_1, C_2, C_3 są wyrażonymi w danej walucie kosztami materiałowymi odpowiednio: zbiornika, termoizolacji, obudowy zewnętrznej. Koszty te, w odniesieniu do rozpatrywanych materiałów, zestawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Materiały użyte do budowy podstawowych elementów ogrzewacza i ich ceny jednostkowe

Tab. 2. Materials used for basic elements of a storage water heater and unit prices per kg

Lp.	Materiał	Cena jednostkowa c_j (zł/kg)
1.	Pianka poliuretanowa PUREX WG-2017NF	7,65
2.	Pianka poliuretanowa PUREX WG-2034NF	7,92
3.	Pianka poliuretanowa PUREX WG-2732E	9,29
4.	Styropian EPS 100 (038)	6
5.	Stal (materiał zbiornika)	2,70
6.	Stal (materiał obudowy)	3,20

Zatem składowe koszty materiałowe przedstawiają się następująco:

$$C_i = \rho_i V_i c_{ji}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (4)$$

W zależności (4) ρ_i (kg/m^3) oznacza gęstość i-tego materiału użytego w konstrukcji ogrzewacza, V_i (m^3) oznacza objętość, jaką i-ty materiał zajmuje w konstrukcji, a c_{ji} oznacza cenę jednostkową danego materiału, wyrażoną np. w (zł/kg) (tab. 2).

Do optymalizacji przyjęto następujące zakresy zmiennych decyzyjnych:

a) grubość blachy zbiornika w postaci ciągu wartości dyskretnych [mm]:

$$g_1 = [1,7 \ 1,8 \ 1,9 \ 2,0 \ 2,1 \ 2,2]$$

b) zakres zmienności grubości izolacji [mm]:

$$g_2 \in [10;60]$$

c) dyskretne wartości współczynnika przewodzenia ciepła [$\text{W}/(\text{mK})$], dla rozpatrywanych czterech materiałów:

$$\lambda_2 = [0,022 \ 0,029 \ 0,033 \ 0,038]$$

d) zakres zmienności średnicy zewnętrznej ogrzewacza [mm]:

$$D \in [250;400]$$

e) zakres zmienności wysokości ogrzewacza [mm]:

$$H \in [500;1000]$$

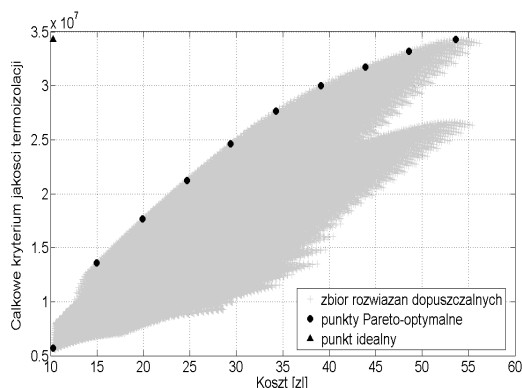
Założono stałość współczynników przejmowania ciepła α_1 i α_2 oraz stałą grubość g_3 blachy obudowy.

Poszukuje się zatem takiego wariantu p_p w zbiorze rozwiązań dopuszczalnych P , w którym nie można znaleźć takiego wariantu p_z , który by dominował nad tym właśnie wariantem p_p [4]:

$$p_p = p \in P : \{ \neg \forall p_z \in P : p_z \succ p_p \} \quad (5)$$

4. Optymalizacja elementów konstrukcyjnych bojlera

Dokonano optymalizacji poszukując rozwiązań Pareto-optymalnych, stosując przegląd zupełny. Na rys. 2 przedstawiono zbiór rozwiązań dopuszczalnych, wraz z naniesionymi dziesięcioma rozwiązaniami Pareto-optymalnymi. Rozwiązania te przedstawione są w tabeli 3.



Rys. 2. Zbiór rozwiązań dopuszczalnych wraz z punktami Pareto-optymalnymi
Fig. 2. Set of acceptable solutions with the Pareto-optimal points

Tab. 3. Zestawienie rozwiązań Pareto-optymalnych
Tab. 3. List of the Pareto-optimal solutions

Nr rozwiązania	g_1 (mm)	g_2 (mm)	λ_2 (W/(m·K))	H (mm)	D (mm)
1	1,7	60	0,038	500	250
2	1,7	29	0,022	500	262
3	1,7	33	0,022	500	312
4	1,7	41	0,022	500	350
5	1,7	39	0,022	500	394
6	1,7	45	0,022	583	400
7	1,7	45	0,022	708	400
8	1,7	45	0,022	833	400
9	1,7	47	0,022	937	400
10	1,7	56	0,022	1000	400

5. Podsumowanie i wnioski

W niniejszej pracy przedstawiono algorytm optymalnego doboru elementów konstrukcyjnych ogrzewacza pojemnościowego wody, ze względu na jego energooszczędność i zmniejszenie kosztów materiałowych. Widoczne w tabeli 3 rozwiązania sugerują zastosowanie jednej grubości blachy zbiornika ogrzewacza – jeśli jest wystarczająca ze względów wytrzymałościowych, a przyjęto iż jest, dalsze zwiększanie jej grubości spowoduje odczuwalny wzrost ceny materiałowej, bez większego wpływu na energooszczędność. Charakterystyczną cechą rozwiązań Pareto-

optymalnych jest również stałość współczynnika przewodzenia ciepła. Algorytm optymalizacyjny wybrał najlepszy z materiałów termoizolacyjnych (o najniższym współczynniku przewodzenia ciepła λ_2) w dziewięciu przypadkach. W rozwiązaniach dość wyraźnie zmienia się natomiast grubość izolacji g_2 , oraz gabaryty zewnętrzne ogrzewacza, czyli jego wysokość i średnica (tab. 3). W tabeli 4 przedstawiono natomiast kolejne rozwiązania Pareto-optymalne, oraz odpowiadające im objętości zbiornika ogrzewacza i koszty materiałowe.

Tab. 4. Pojemności zbiorników ogrzewaczy i koszty materiałowe, w zależności od rozwiązania
Tab. 4. Capacities of storage water heaters and material costs, depending on a solution number

Nr rozwiązania	Objętość (l)	Koszt materiałowy (zł)
1	6,2	10,28
2	15,8	14,99
3	23,0	19,91
4	27,1	24,72
5	37,9	29,38
6	42,5	34,26
7	51,6	39,08
8	60,7	43,91
9	66,4	48,56
10	63,2	53,61

Jak wspomniano powyżej, dziewięć z dziesięciu rozwiązań optymalnych dotyczy użycia jako materiału izolacyjnego pianki poliuretanowej o najniższym współczynniku przewodzenia ciepła. Tylko jedno z rozwiązań odnosi się do użycia najgorszego pod względem termoizolacji wśród rozpatrywanych materiałów – styropianu. Należy jednak pamiętać, że do kosztów samego styropianu jako materiału, należałoby dodać koszty związane z jego przetwórstwem na odpowiedni do użycia w bojlerze kształt. Również w przypadku materiałów w postaci pianki poliuretanowej pojawiają się koszty jej przetworzenia w procesie produkcji bojlera – wykonuje się to zwykle w specjalnych agregatach służących do spieniania. Jak widać, w każdym z przypadków użycia do produkcji materiału termoizolacyjnego, nieuniknione są koszty dodatkowe. Przedmiotem innej analizy mogłoby być to, w jaki sposób owe koszty dodatkowe wpływają na gotowy produkt. Zapewne jest to ściśle związane z wielkością produkcji, czy ilością odpowiedniego oprzyrządowania w danym zakładzie produkcyjnym. W niniejszej pracy skupiono się natomiast na kosztach samych materiałów. Innym, dość istotnym parametrem, jest objętość zbiornika ogrzewacza pojemnościowego. Ze względów funkcjonalnych, mało uzasadnione jest posiadanie w gospodarstwie domowym ogrzewacza o pojemności mniejszej niż 50 - 60 l. Z tego właśnie względu stworzony algorytm optymalizacyjny można poszerzyć o ograniczenia eliminujące wśród rozwiązań optymalnych konstrukcje o zbyt małych pojemnościach zbiornika.

6. Literatura

- [1] Chamera S., Maciejewski I., Krzyżyński T.: Identyfikacja parametryczna modelu ogrzewacza wody. PAK 2009 nr 09, s. 780-782.
- [2] Wiśniewski S., Wiśniewski T. S.: Wymiana ciepła. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 2000.
- [3] Furmański P., Wiśniewski T. S., Banaszek J.: Izolacje cieplne. Mechanizmy wymiany ciepła, właściwości cieplne i ich pomiary. Instytut Techniki Ciepłej, Politechnika Warszawska, Warszawa 2006.
- [4] Tarnowski W.: Optymalizacja i polioptymalizacja w mechatronice. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2009.