



Czy ogrzewanie elektryczne może być opłacalne: ukraińskie doświadczenia

Aleksander Szkarowski
Politechnika Koszalińska

Anatolij Kolienko
Poltawski Narodowy Uniwersytet Techniczny, Ukraina

1. Wstęp

Bodźcem doskonalenia elektrycznych systemów ogrzewania jest stały wzrost cen gazu ziemnego, służącego za paliwo w kotłowniach o małej i średniej mocy oraz odpowiednie zwiększenie taryf na energię ciepłą w zcentralizowanych układach ciepłowniczych bądź też kosztów własnych jej wytwarzania w autonomicznych źródłach ciepła.

Energię elektryczną można rozpatrywać jako alternatywę ciepła otrzymywanego przy spalaniu paliwa organicznego. Ponadto, wykorzystanie elektryczności na cele grzewcze sprzyja rozwiązywaniu problemów energetyki, i przede wszystkim problemu deficytu mocy manewrowych do regulacji dobowego obciążenia systemu energetycznego kraju lub regionu, na tle proficytu produkcji energii elektrycznej. Wykorzystując energię elektryczną na ogrzewanie w okresie nocnym można złagodzić dobową nierównomierność jej zużycia w układzie energetycznym.

2. Ogólna ocena możliwości wykorzystania energii elektrycznej na cele ogrzewania

Wdrażanie systemów ogrzewania elektrycznego powoduje zagadnienie oceny ich efektywności. Ważnym jest zarówno ekonomiczny rachunek wykorzystania elektryczności, będącej wtórnym nośnikiem energii w stosunku do chemicznej energii paliwa, jak i termodynamiczne

wskaźniki efektywności elektrycznych systemów ogrzewania. Rozpatrzmy najpierw ekonomiczny aspekt wykorzystania energii elektrycznej na cele c.o. i c.w. budynków mieszkalnych i użyteczności publicznej.

Z punktu widzenia termodynamiki 1 m^3 gazu zimnego o wartości opałowej 8100 kcal/m^3 (34 MJ/m^3) ekwiwalentny jest $9,4 \text{ kW}\cdot\text{h}$ energii elektrycznej (pod warunkiem 100% transformacji). Jednak niska sprawność elektrowni kondensacyjnych sprawia, że jednostkowa produkcja energii elektrycznej nie przekracza $3\text{--}3,5 \text{ kW}\cdot\text{h}$ na 1 m^3 gazu, co automatycznie odbija się na jej taryfach. To z kolei wpływa na koszty ciepła produkowanego w systemach ogrzewania elektrycznego.

Na przykład cena $1 \text{ kW}\cdot\text{h}$ energii cieplnej dla grupowych odbiorców nieprzemysłowych, podłączonych do zcentralizowanych układów z kotłownią gazową na Ukrainie wynosi ok. $0,33 \text{ zł}$ (tu i dalej stosuje się ceny gazu i elektryczności na Ukrainie oraz orientacyjny stosunek pomiędzy złotym a hrywną wg stanu na grudzień 2012 r.) Natomiast koszty produkcji ciepła w autonomicznym źródle z kotłem elektrycznym na cele ogrzewania budynku wielorodzinnego wynoszą ok. $0,46 \text{ zł}$ (taryfa jednostrefowa), czyli 1,4 razy więcej.

Dla odbiorców indywidualnych sytuacja wygląda jeszcze mniej optymistycznie. Za $1 \text{ kW}\cdot\text{h}$ ciepła przy pracy kotła gazowego w budynku jednorodzinym odbiorca zapłaci ok. $0,06 \text{ zł}$, natomiast za taką samą ilość energii otrzymanej z kotła elektrycznego według taryfy jednostrefowej – $0,14 \text{ zł}$, czyli 2,3 razy więcej.

Taka różnica kosztów dla odbiorcy naturalnie nie może sprzyjać rozwojowi rynku kotłów elektrycznych. Oczekiwany wzrost taryfy „so-cjalnej” na gaz ziemny w sektorze mieszkaniowym mógłby tylko nieco załagodzić sytuację, lecz trudno jest oczekiwać zbliżenia kosztów produkcji ciepła przy spalaniu paliwa węglowodorowego i wykorzystania energii elektrycznej.

Niewątpliwą zaletą kotłów elektrycznych jest wysoka sprawność transformacji energii elektrycznej w ciepło sięgająca 99%. Stosując gaz ziemny w kotłach tradycyjnych osiągnąć można do 91–92% sprawności (w stosunku do górnego ciepła spalania). Wyższa sprawność skutkuje skraplaniem pary wodnej ze spalin i wynikającymi z tego problemami. Tylko w kotłach kondensacyjnych współczynnik sprawności cieplnej może być zwiększony do 95–96%.

Jednak energia elektryczna jest pochodną w stosunku do chemicznej energii paliwa. Różnica sprawności kotłów gazowych i elektrycznych (od 4–5% do 8–9% na korzyść ostatnich) udaremniana jest przez skrajnie niską sprawność cyklu parowo-mechanicznego elektrowni tradycyjnych. Dlatego sumaryczna sprawność energetyczna bezpośredniego wykorzystania paliwa organicznego zawsze będzie wyższa w porównaniu z generacją ciepła w kotłach elektrycznych źródeł autonomicznych. Na ogół koszty wytwarzania ciepła w kotłach elektrycznych są 1,5–2,0 razy większe w porównaniu z kotłami gazowymi.

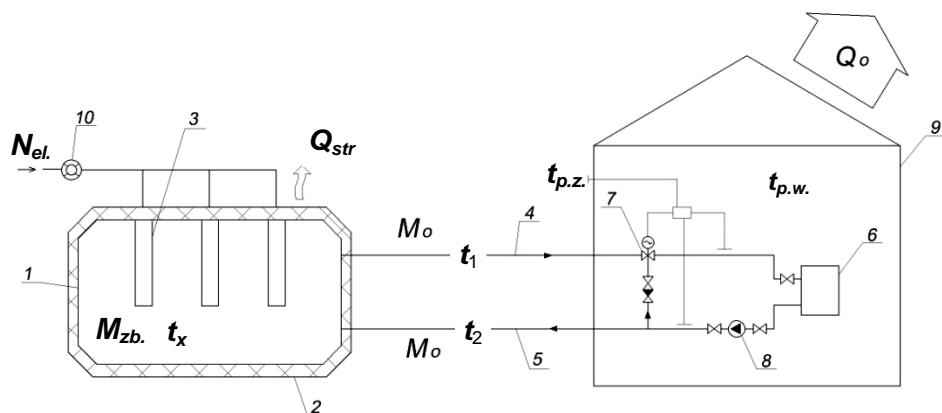
Dla urządzeń przemysłowych zużycie paliwa umownego także jest 10–40% większe w przypadku wykorzystania energii elektrycznej w porównaniu z gazem ziemnym. Elektryczność niewątpliwie pozwala na dokładniejszą regulację temperatury procesu termicznej obróbki wyrobów, jednak wskaźniki ekonomiczne pieców elektrycznych są istotnie gorsze od charakterystyk urządzeń gazowych. Przykładowo koszty nagrzania indukcyjnego są 1,3–2,4 razy większe od gazowego [1].

3. Teoretyczne podstawy zastosowania elektroakumulacyjnych układów ogrzewania

Powyższe wnioski słuszne są tylko, gdy dla cen energii elektrycznej nie obowiązują stymulujące rozwiązania taryfowe („taryfa nocna”, „taryfa zielona” itp.). Istotne, chociaż ograniczone czasowo, zmniejszenie kosztów elektryczności ma miejsce przy stosowaniu dwóch- i trójstrefowych taryf. Taki sposób rozliczenia się z dostawcą prądu czyni koncepcję ogrzewania elektro-akumulacyjnego bardzo atrakcyjną [2].

Nocą, gdy obowiązuje taryfa ulgowa, wykonuje się nagrzanie i gromadzenie gorącej wody w zbiorniku akumulacyjnym. Jej ilość powinna wystarczyć do pracy instalacji c.o. w okresie dziennym, bez zużycia energii elektrycznej wg podwyższonej taryfy. Odbiór ciepła w tych godzinach odbywa się wyłącznie ze zbiornika. Schemat ideowy takiego układu przedstawiono na rys. 1.

Określenie podstawowych konstrukcyjnych parametrów i wskaźników efektywności takiego układu polega na szeregu obliczeń.



Rys. 1. Schemat układu elektro-akumulacyjnego: 1 – zbiornik; 2 – izolacja; 3 – grzałki; 4 – przewód zasilający; 5 – przewód powrotny; 6 – grzejniki; 7 – zawór trójdrogowy; 8 – pompa; 9 – budynek ogrzewany; 10 – wielostrefowy licznik

Fig. 1. Scheme of electric heat-storage system: 1 – heat receiver; 2 – isolation; 3 – electric heaters; 4 – feeding pipe; 5 – return pipe; 6 – heaters; 7 – triple control valve; 8 – pump; 9 – heated building; 10 – multirate billing meter

Danymi wejściowymi są:

1. Obliczeniowa moc cieplna instalacji ogrzewania Q_o [kW].
2. Obliczeniowy strumień masy czynnika grzejącego, M_o [kg/s], według wzoru:

$$M_o = \frac{Q_o}{(t_1 - t_2) \cdot c_w}, \quad (1)$$

gdzie: t_1 i t_2 – obliczeniowe temperatury czynnika w przewodzie zasilającym i powrotnym instalacji c.o. [°C]; c_w – ciepło właściwe wody [kJ/(kg·K)].

3. Czas nocnego poboru energii elektrycznej wg taryfy ulgowej i akumulacji ciepła, τ [h]. Przykładowo, $\tau = 7$ h (od 23:00 do 6:00). Taryfa nocna na Ukrainie wynosi 0,16 zł/kW·h.
4. Czas wykorzystania zgromadzonej energii bez jej uzupełniania z zewnątrz, $(24 - \tau)$ [h]. W tym czasie wykorzystanie energii elektrycznej nieuzasadnione jest ekonomicznie, ponieważ taryfy dzienne na Ukrainie przewyższają nocne 3–5 razy i wynoszą:

- w okresie półszczytowym – 0,47 zł/kW·h (6:00 do 8:00; 10:00 do 17:00 oraz 21:00 do 23:00 (razem 11 godzin w ciągu doby);
 - w okresie szczytowym – 0,77 zł/kW·h (8:00 do 10:00 i 17:00 do 21:00 (6 godzin w ciągu doby).
5. Współczynnik uwzględniający straty ciepła zbiornika do otoczenia, η_{zb} . W przypadku dobrej izolacji $\eta_6 = 0,93-0,95$.
 6. Względne obliczeniowe zapotrzebowanie na ciepło tej części budynków lub pomieszczeń, gdzie jest możliwe częściowe lub całkowite wyłączenie ogrzewania w okresie akumulacji ciepła, n' . Jest to możliwe dzięki bezwładności cieplnej konstrukcji budowlanych lub dopuszczalnego, ograniczonego w czasie obniżenia temperatury w pomieszczeniach.
 7. Względne obliczeniowe zapotrzebowanie na ciepło tej części budynków lub pomieszczeń, gdzie zmniejszenie mocy lub wyłączenie instalacji c.o. w okresie akumulacji ciepła nie jest możliwe, n'' .

Zatem dobowe zużycie ciepła na cele grzewcze budynku lub grupy budynków, Q_o^{db} [kW·h], można obliczyć ze wzoru (zakładając, że możliwe jest całkowite wyłączenie ogrzewania w części instalacji c.o. na czas τ [h]):

$$Q_o^{db} = Q_o \cdot n' (24 - \tau) + Q_o \cdot n'' 24. \quad (2)$$

Jeśli odłączenie ogrzewania podczas poboru energii elektrycznej wg taryfy ulgowej nie jest możliwe, to $n' = 0$; $n'' = 1,0$. Jeśli w okresie nocnym możliwe jest odłączenie ogrzewania we wszystkich pomieszczeniach (budynkach), to $n' = 1,0$; $n'' = 0$. W przypadku odłączenia połowy obciążenia c.o. w okresie nocnym $n' = 0,5$; $n'' = 0,5$.

Zadaniem obliczeń jest określenie:

- wymaganej mocy elektrycznej, zapewniającej podgrzanie strumienia wody M_o [kg/s] do temperatury t_1 [°C], która będzie dostateczna dla zapewnienia komfortowych warunków przebywania ludzi zarówno w czasie akumulacji ciepła jak i jego zużycia;
- wymaganej objętości zbiornika, który w warunkach cyklicznego podgrzania wody w ciągu doby musi zapewnić wymaganą temperaturę wody w przewodzie zasilającym instalacji c.o.

Temperatura ta zależna jest od bieżących warunków klimatycznych i określana wykresem grzewczym czynnika.

1. Wymaganą moc grzałek elektrycznych, N_{el} [kW], określić można z równania bilansu cieplnego układu:

$$\eta_{zb} \cdot N_{el} \cdot \tau = n' \cdot Q_o \cdot (24 - \tau) + n'' \cdot Q_o \cdot 24, \quad (3)$$

skąd:

$$N_{el} = \frac{Q_o [n' \cdot (24 - \tau) + 24 \cdot n'']}{\eta_{zb} \cdot \tau}. \quad (4)$$

Wyniki obliczeń wymaganej mocy elektrycznej zapewniającej akumulacyjny tryb pracy układu, w zależności od temperatury zewnętrznej, podano na rysunkach 2–4 dla różnych wartości n' i n'' , a także dla różnego czasu gromadzenia energii τ (strefa klimatyczna -23°C).

Dla większej uniwersalności wyników przedstawiono je w postaci względnej mocy elektrycznej k , która jest stosunkiem wymaganej mocy elektrycznej do obliczeniowej mocy instalacji c.o.:

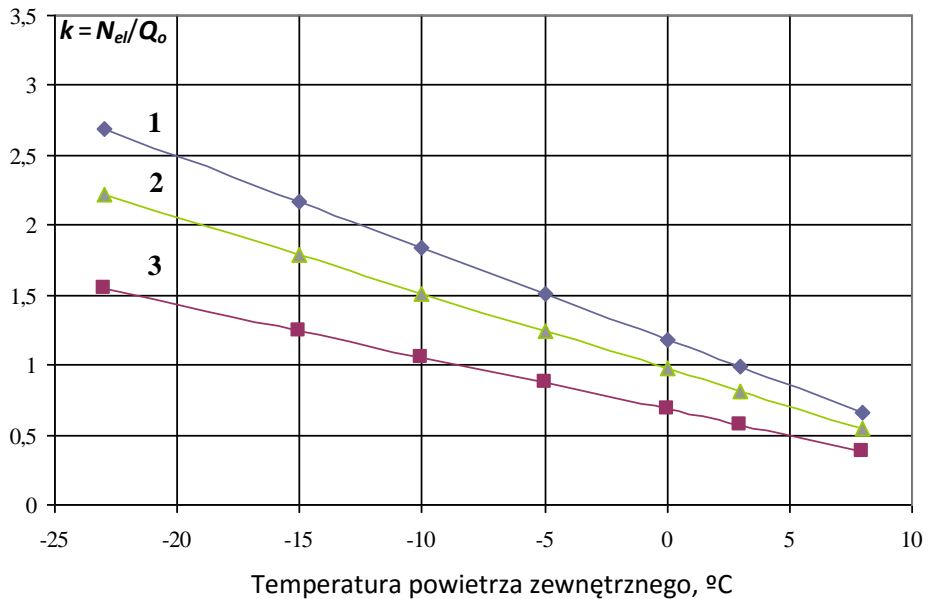
$$k = \frac{N_{el}}{Q_o}, \quad (5)$$

Np. zgodnie z rys. 3, do zużycia energii elektrycznej tylko według ulgowej taryfy i przy braku możliwości obniżenia mocy ogrzewania nocą ($n' = 0$), wymagana moc elektryczna powinna być większa od obliczeniowej mocy instalacji c.o. prawie 4 razy (przez cały sezon grzewczy).

Jeśli założyć akumulacyjny tryb pracy układu tylko przy temperaturze zewnętrznej nie niższej niż -10°C (ok. 87% czasu trwania sezonu grzewczego), moc grzałek elektrycznych obniżona może być do (2,5–2,6) Q_o . A wydłużając czas gromadzenia energii w zbiorniku do 10 godzin, z których 3 będą przypadły na okres podwyższonej taryfy, moc elektryczną układu zmniejszyć można do (1,8–1,9) Q_o . Jednak atrakcyjność ekonomiczna rozwiązania przy tym znacznie maleje.

Poza tym pozostaje problem zapewnienia potrzeb ogrzewania w okresie z temperaturą zewnętrzną od -10°C do -23°C , co wynosi ok. 600 h dla rozpatrywanej strefy klimatycznej.

Przy braku szczytowego kotła gazowego lub innego źródła ciepła jedynym rozwiązaniem pozostaje zużycie elektryczności w okresie dziennym wg niekorzystnej taryfy.



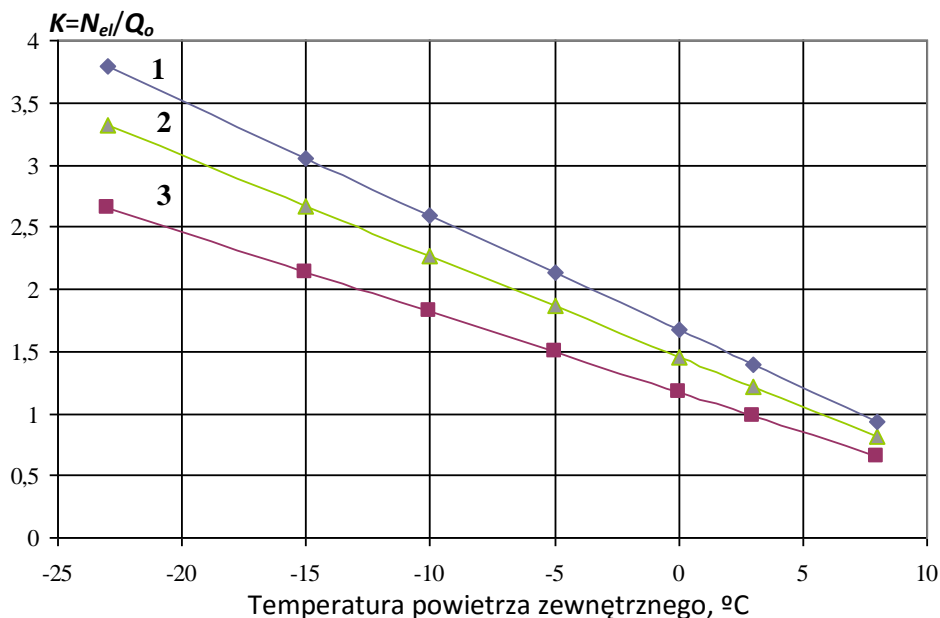
Rys. 2. Zależność względnej mocy grzałek elektrycznych od temperatury zewnętrznej przy $n' = 1,0$; $n'' = 0,0$ (cała instalacja nocą może zostać wyłączona), dla różnego czasu gromadzenia energii: 1 – $\tau = 7$ h (pobór elektryczności tylko wg taryfy ulgowej); 2 – $\tau = 8$ h; 3 – $\tau = 10$ h

Fig. 2. Dependence of relative power of electric heaters on external temperature at $n' = 1,0$; $n'' = 0,0$ (at night all system of heating can be switched off), for various time of accumulation of energy: 1 – $\tau = 7$ hrs (electricity consumption only on a reduced rate); 2 – $\tau = 8$ hrs; 3 – $\tau = 10$ hrs

Przypomnijmy, że z 1 m^3 gazu ziemnego, którego cena wynosi ok. $1,6 \text{ zł/m}^3$ w kotłowni gazowej uzyskać może do $8,1 \text{ kW}\cdot\text{h}$ ciepła, natomiast z wykorzystaniem energii elektrycznej wg taryfy dziennej za te pieniądze wyprodukować można tylko ok. $2 \text{ kW}\cdot\text{h}$. Z tego wynika, że sprawność ekonomiczna elektro-akumulacyjnych układów grzewczych w przypadku zużycia energii elektrycznej w okresie szczytowym i półszczytowym w nieunikniony sposób będzie przegrywać z ogrzewaniem czysto gazowym.

Natomiast w przypadku poboru elektryczności wyłącznie w okresie obowiązywania taryfy ulgowej pewne korzyści ekonomiczne układów ogrzewania elektrycznego niewątpliwie występują. Odbiorca grupowy w budynku wielorodzinnym z układem elektro-akumulacyjnym może aż

dwukrotnie zaoszczędzić w porównaniu z podłączeniem do sieci ciepłej. A dla odbiorcy indywidualnego koszty wytwarzania 1 kW·h ciepła w kotle gazowym i elektrycznym będą zbliżone.



Rys. 3. Zależność względnej mocy grzałek elektrycznych od temperatury zewnętrznej przy $n' = 0$, $n'' = 1,0$: 1 – $\tau = 7$ h; 2 – $\tau = 8$ h; 3 – $\tau = 10$ h

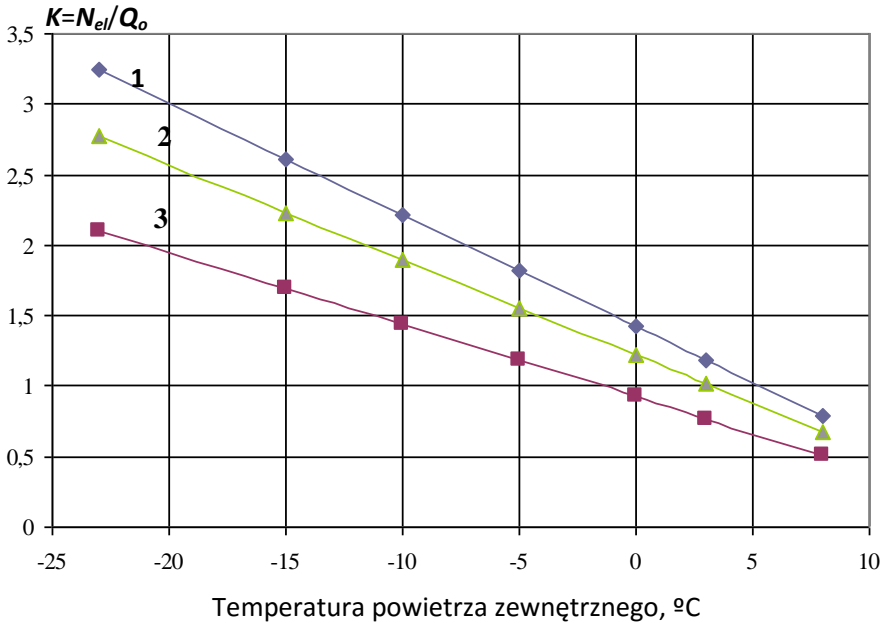
Fig. 3. Dependence of relative power of electric heaters on external temperature at $n' = 0$, $n'' = 1,0$: 1 – $\tau = 7$ hrs; 2 – $\tau = 8$ hrs; 3 – $\tau = 10$ hrs

2. Wymagana objętość zbiornika, V_{zb} , [dm³ (M³)], lub jego pojemność masowa M_{zb} , [kg (t)]. Zbiornik o takiej pojemności powinien zapewniać wymaganą temperaturę czynnika w ciągu doby bez zużycia energii elektrycznej w okresie podwyższonej taryfy.

Wprowadźmy pojęcie względnej pojemności zbiornika, m [h]:

$$m = \frac{M_{zb}}{M_o}, \quad (6)$$

która stanowi czas wykorzystania całej jego objętości, jeśli odbiór czynnika odbywa się przy obliczeniowym natężeniu przepływu.



Rys. 4. Zależność względnej mocy grzałek elektrycznych od temperatury zewnętrznej przy $n' = 0,5$, $n'' = 0,5$: 1 – $\tau = 7$ h; 2 – $\tau = 8$ h; 3 – $\tau = 10$ h

Fig. 4. Dependence of relative power of electric heaters on external temperature at $n' = 0$, $n'' = 1,0$: 1 – $\tau = 7$ hrs; 2 – $\tau = 8$ hrs; 3 – $\tau = 10$ hrs

Jeśli bieżącą wartość temperatury czynnika w zbiorniku oznaczyć przez t_x , to równanie bilansu cieplnego dla jedno-godzinowego cyklu cyrkulacji przedstawić można jako:

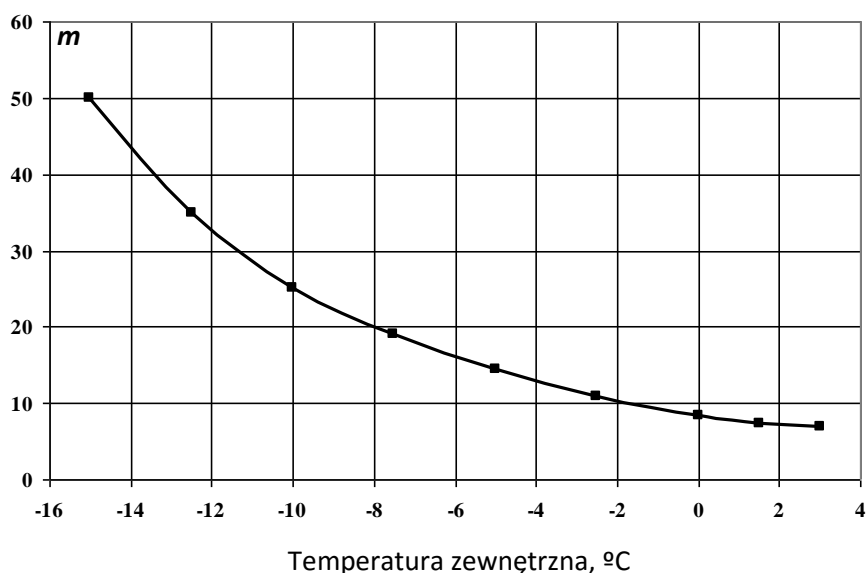
$$c_w \cdot M_{zb} \cdot t_1 - c_w \cdot M_o \cdot t_1 + c_w \cdot M_o \cdot t_2 = c_w \cdot M_{zb} \cdot t_x, \quad (7)$$

skąd uwzględniając (5), uzyskać można wzór na tę temperaturę:

$$t_x = \frac{M_{zb} \cdot t_1 - M_o \cdot (t_1 - t_2)}{M_{zb}} = \frac{m \cdot M_o \cdot t_1 - M_o(t_1 - t_2)}{m \cdot M_o} = \frac{t_1 \cdot (m - 1) + t_2}{m}, \quad (8)$$

Przykładowo przy $m = 10$, po pierwszej godzinie cyrkulacji czynnika grzejnego w instalacji c.o. temperatura wody w zbiorniku obniży się z 95°C do $92,5^\circ\text{C}$. Jeśli pojemność zbiornika zmniejszy dwukrotnie ($M_{zb} = 5M_o$), to temperatura wody po jednej godzinie wyniesie 90°C . W trakcie dalszej cyrkulacji temperatura wody w zbiorniku będzie dalej się obniżać, a stałość temperatury wody na zasileniu instalacji będzie utrzymywana dzięki działaniu zaworu trójdrogowego.

Rys. 5 obrazuje wykres wymaganej względnej objętości zbiornika w zależności od temperatury zewnętrznej pod warunkiem zapewnienia pracy instalacji c.o. bez uzupełnienia energii z sieci elektrycznej w okresie podwyższonej taryfy. Wykres sporządzono dla obliczeniowej różnicy temperatur w instalacji c.o. $\Delta t = 20^\circ\text{C}$ oraz strefy klimatycznej -23°C .



Rys. 5. Względna objętość zbiornika w zależności od temperatury zewnętrznej, do której możliwe jest działanie układu bez zużycia energii elektrycznej w godzinach dziennych

Fig. 5. Relative capacity of the accumulator depending on external temperature, to which it is possible to work without consumption of electric energy during the daytime

Na przykład praca elektro-akumulacyjnego układu grzewczego budynku mieszkalnego do temperatury zewnętrznej -10°C wymaga objętości względnej zbiornika nie mniejszej niż 25 ($M_{zb} = 25 M_o$). Dla budynku z obliczeniowym zużyciem ciepła na c.o. 250 kW wymagana objętość zbiornika wyniosłaby ok. 267 m^3 . Umieszczenie zbiornika o takiej pojemności wymaga specjalnych rozwiązań konstrukcyjno-przestrzennych a także znacznych dodatkowych nakładów inwestycyjnych.

Perspektywnym rozwiązaniem w kierunku zmniejszenia objętości akumulatorów ciepła może być wykorzystanie ciepła przemiany

fazowej, np. przemiany „topienie-krystalizacja” binarnych układów solowych (wodzianów krystalicznych soli nieorganicznych). Przy tym materiał akumulujący gromadzi zarówno ciepło topienia, jak i entalpię stałej i ciekłej fazy. Przykładowo przejściu chlorku wapniowego ze stałego stanu skupienia do ciekłego towarzyszy pochłanianie ok. 176 kJ/kg ciepła. Tyle ciepła akumuluje 1 kg wody przy podgrzaniu z 48 do 90°C.

Nie mniej woda pozostaje obecnie najbardziej używanym rodzajem materiału akumulującego w układach ciepłowniczych. Zastosowanie innych materiałów potrzebuje jeszcze opracowania niezawodnych rozwiązań technologicznych i konstrukcyjnych.

Istotnym problemem zastosowania elektro-akumulacyjnych układów grzewczych jest potrzeba modernizacji zewnętrznych sieci kablowych. Dość często istniejące zasilanie nie jest w stanie zapewnić dodatkowego obciążenia powstającego przy ogrzewaniu elektrycznym. Przykładowo dla 5 kondygnacyjnego 80-mieszkaniowego budynku o obliczeniowej mocy ogrzewania 250 kW, moc grzałek elektrycznych zgodnie z rys 3 wyniosłaby ok. 900 kW. Podłączenie takiego obciążenia do istniejącej sieci kablowej mogłoby stanowić poważny problem.

4. Wnioski

Przedstawiono ekonomiczne oszacowanie możliwości zastosowania systemów ogrzewania elektro-akumulacyjnego oraz metodykę określenia ich głównych parametrów. Wyniki obliczeń wg opracowanej metodyki świadczą o ograniczonych możliwościach takich układów grzewczych jak również istotnych nakładach inwestycyjnych na ich wdrażanie.

Jednak rozpatrywane rozwiązanie techniczne może być opłacalne w przypadku zastosowania stymulujących wielostrefowych taryf na energię elektryczną.

Literatura

1. **Лисиенко В.Г.:** *Анализ тепловой работ электрических печей для обработки титановых и алюминиевых сплавов.* Известие вузов. Цветная металлургия. №4, 63–68 (1999).
2. **Федоров Н.А.:** *Техника и эффективность использования газа.* М., Недра, 311, (1983).

Whether Electric Heating May Be Cost-effective? Ukrainian Experience

Abstract

Incentive of development of electric heating systems is the continuous growth of the gas fuel price and the corresponding tariffs for thermal energy in the centralized systems of a heat supply. However the electricity is the secondary energy carrier in relation to chemical energy of organic fuel. Higher efficiency of electric boilers economically collapses by extremely low efficiency of electricity generation at the thermal power plants. To municipal consumers use of electricity is 1.4 times more expensive than heat from the centralized sources, and to individual consumers – 2.3 times. But the multirate system of payment for electricity allows to accumulate energy at night, with payment on the lowest tariff, and to use it throughout the day. Fig. 1 shows the schematic diagram of such heating system.

The authors developed the procedure of definition of two most important characteristics of electro-accumulation heating systems: the required power of electric heaters and necessary volume of the storage tank. Fig. 2–4 show the dependence of the required relative electrical power of system on the external temperature and time of the consumption of electric power. Fig. 5 shows the dependence of the necessary relative volume of the storage tank on external temperature. This capacity will allow heating system to work in the course of twenty-four hours, consuming electric power only at the preferential tariff at night.

The need of positioning the storage tank of large sizes and modernization of the feeding electrical networks remain the serious problems of the accumulation systems of electro-heating. Based on the above results, authors came to opinion that application of the considered technical solution has limited opportunities, but can be paid back in case of application of stimulating many-part tariffs for the electric power.