

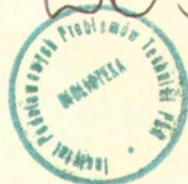
- 7.2. — transport ciepła, konwekcja,  
przewodnictwo i promieniowanie
- 7. — ciepło
- 5.18.5. — budynki

Leszek Laskowski

EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA  
SYSTEMÓW BIERNEGO  
OGRZEWANIA SŁONECZNEGO

22/1994

P. 269

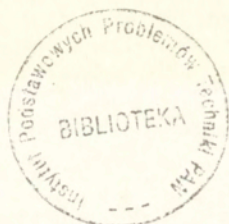


WARSZAWA 1994

<http://rcin.org.pl>

ISSN 0208-5658

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 7 czerwca 1994 r.



56627



Na prawach rękopisu

---

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN  
Nakład 100 egz. Ark. wyd. 1,5 Ark. druk. 1,6  
Oddano do drukarni w lipcu 1994 r.

---

Wydawnictwo Spółdzielcze sp. z o.o.  
Warszawa, ul. Jasna 1

<http://rcin.org.pl>

Leszek Laskowski

Centrum Helio-Ekostruktur  
Pracownia Problemów  
Budownictwa Energooszczędnego

## EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA SYSTEMÓW BIERNEGO OGRZEWANIA SŁONECZNEGO

Suplement do monografii pt. "Systemy biernego ogrzewania słonecznego - zagadnienia funkcjonowania i efektywności energetycznej"

### STRESZCZENIE

*Sformułowano równania dobowego bilansu ciepła w matematycznym modelu systemów biernego ogrzewania słonecznego. Z uwzględnieniem warunku periodyczności przeprowadzono analizę stanów termicznych przegród budowlanych spełniających w systemie funkcję zasobnika ciepła. Na tej podstawie wyprowadzono zależności określające ciepło słoneczne wykorzystane do ogrzewania pomieszczeń we współpracy rozważanych systemów z konwencjonalnym urządzeniem grzewczym. Zdefiniowano mierniki efektywności energetycznej biernego ogrzewania słonecznego oraz podano sposób ich obliczania.*

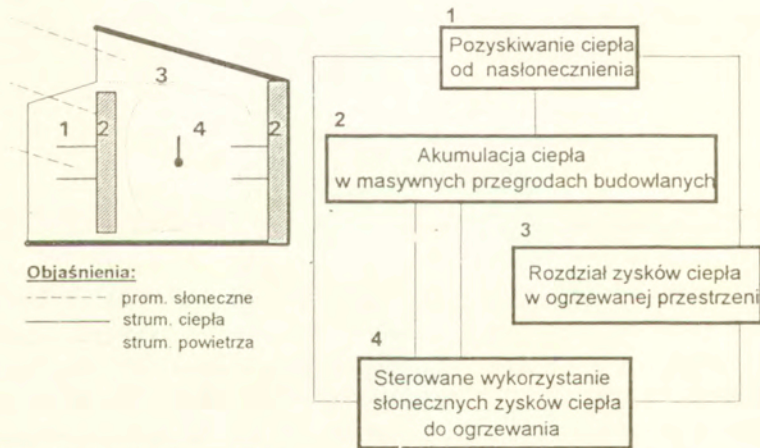
*Niniejsze opracowanie stanowi suplement do monografii autora pt. "Systemy biernego ogrzewania słonecznego - zagadnienia funkcjonowania i efektywności energetycznej" opublikowanej w Studiach z Zakresu Inżynierii, nr 34 (1993). Zweryfikowano zawarte tam wyrażenia charakteryzujące ilość ciepła słonecznego wykorzystanego w ciągu doby do ogrzewania pomieszczeń oraz rozwinęto i uogólniono rozważania dotyczące określenia mierników efektywności energetycznej systemów. Zachowano wprowadzone wcześniej określenia i definicje nowych pojęć, jak również oznaczenia podstawowych wielkości fizycznych.*

...



## I. ZWIĘZŁA CHARAKTERYSTYKA SYSTEMÓW BIERNEGO OGRZEWANIA SŁONECZNEGO

Systemy biernego ogrzewania słonecznego tworzą układy strukturalno-materiałowe budynku ułatwiające sterowane wykorzystanie energii słonecznej do ogrzewania pomieszczeń bez odrębnej instalacji kolektora, zasobnika ciepła, przewodów i mechanicznych urządzeń napędowych. Funkcje wymienionych elementów spełniają w nich helioaktywne przegrody i struktury budowlane, to jest okna, oszklone przestrzenie buforowe, zewnętrzne ściany kolektorowe lub kolektorowo-akumulacyjne oraz masywne przegrody wewnętrzne. Dystrybucja pozyskanego ciepła odbywa się na drodze swobodnej konwekcji, przewodzenia i promieniowania (rys. 1).



Rys. 1 Budynek jako system pozyskiwania, akumulacji, rozdziału i sterowanego wykorzystania ciepła słonecznego do ogrzewania pomieszczeń

W zależności od miejsca konwersji termicznej energii promieniowania słonecznego oraz sposobu dostarczania ciepła do ogrzewanych pomieszczeń, rozważane systemy dzielą się na dwa rodzaje, określone w opracowaniu [1] mianem systemów zysków bezpośrednich lub pośrednich.

W systemie zysków bezpośrednich energia promieniowania słonecznego dociera do pomieszczeń przez okna. Konwersja termiczna tej energii następuje na powierzchni całej nieprzezroczystej obudowy. Pozyskane ciepło w części  $Q_{sj}$  od razu ogrzewa powietrze, a w pozostałej części  $Q_{sa}$  jest pochłaniane i akumulowane do późniejszego wykorzystania

w masywnych przegrodach wewnętrznych, spełniających w systemie funkcję zasobnika ciepła i grzejnika.

W systemie zysków pośrednich wymienione funkcje kolektora, zasobnika ciepła i grzejnika spełnia masywna ściana zewnętrzna bez izolacji termicznej (tzw. ściana kolektorowo-akumulacyjna), umieszczona za oszkleniem ochronnym. Absorbowane i pochłaniane przez nią ciepło słoneczne  $Q_{sa}$  jest przewodzone w kierunku ogrzewanego pomieszczenia i przejmowane przez powietrze wewnętrzne.

Jeśli wymagane jest utrzymanie temperatury powietrza wewnętrznego na określonym poziomie, to systemy biernego ogrzewania słonecznego muszą współpracować z konwencjonalnymi urządzeniami ogrzewczym i wentylacyjnym lub klimatyzacyjnym o wydajnościach regulowanych w sposób w pełni nadający za zmiennym zapotrzebowaniem na moc cieplną. Badania eksperymentalne wykazują, że w przypadkach optymalnego rozwiązania systemy te zdecydowanie poprawiają bilans cieplny budynku i przyczyniają się do znacznych oszczędności energii. Dotyczy to zwłaszcza małych budynków mieszkalnych, co znalazło potwierdzenie również w wynikach badań własnych, przytoczonych i omówionych w opracowaniu [1].

## 2. ZAŁOŻENIA DO MODELU MATEMATYCZNEGO

Matematyczny model systemów biernego ogrzewania słonecznego sformułowano głównie w celu określenia dobowej efektywności energetycznej w dowolnym miesiącu sezonu ogrzewczego. Z tego względu nie rozpatruje się chwilowych stanów termicznych systemu i nie wnika w zagadnienia regulacji eksploatacyjnej procesów wymiany ciepła. Rozważania dotyczą budynków mieszkalnych lub obiektów o podobnych wymaganiach w zakresie mikroklimatu i komfortu cieplnego pomieszczeń. W celu sformułowania równań bilansu ciepła oraz określenia mierników efektywności energetycznej scharakteryzowanych uprzednio systemów przyjęto następujące założenia.

1. System biernego ogrzewania słonecznego funkcjonuje we współpracy z urządzeniem ogrzewczym przez całą dobę tak, iż nie występuje przegrzewanie pomieszczeń. W dowolnym miesiącu sezonu ogrzewczego model dotyczy hipotetycznego cyklu, w którym każda doba umownie dzieli się na dwie następujące po sobie pory:

- *dzienną*, w której równocześnie zachodzą procesy pozyskiwania, akumulacji i wykorzystania ciepła słonecznego do ogrzewania pomieszczeń;
- *nocną*, w której następuje tylko wykorzystanie do ogrzewania ciepła zakumulowanego uprzednio w zasobniku.

2. Zewnętrzne warunki termiczne systemu charakteryzują:

a) średnia temperatura powietrza zewnętrznego równa  $T_{ed}$  w porze dziennej lub  $T_{en}$  w porze nocnej, przy czym

$$(2.1a) \quad T_{ed} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \left( \frac{1}{t_d(k)} \sum_{h=1}^{t_d(k)} T_e(h,k) \right) \quad [^{\circ}\text{C}],$$

$$(2.1b) \quad T_{en} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \left( \frac{1}{t_d(k)} \sum_{h=t_d(k)+1}^{t_n(k)} T_e(h,k) \right) \quad [^{\circ}\text{C}];$$

b) gęstość  $H_J > 0$  energii całkowitego promieniowania słonecznego padającego w porze dziennej na oszklenie elementów kolektorowych budynku

$$(2.2) \quad H_1 = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \sum_{h=1}^{t_d(k)} J_{(h,k)} \quad [\text{W} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}];$$

c) średni czas  $t_d$  trwania pory dziennej

$$(2.3a) \quad t_d = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m t_d(k) \quad [\text{h}]$$

oraz nocnej

$$(2.3b) \quad t_n = 24 - t_d \quad [\text{h}].$$

W powyższych wzorach przyjęto następujące oznaczenia:

- $m$  - sumaryczna liczba dni rozpatrywanego miesiąca;
- $t_d(k), t_n(k)$  - sumaryczna liczba godzin w porach dziennej lub nocnej  $k$ -tej doby miesiąca;
- $T_e(h,k)$  - temperatura powietrza zewnętrznego w  $h$ -tej godzinie  $k$ -tej doby, [ $^{\circ}\text{C}$ ];
- $J_{(h,k)}$  - gęstość energii całkowitego promieniowania słonecznego padającego na oszklenie elementów kolektorowych budynku w  $h$ -tej godzinie  $k$ -tej doby, [ $\text{W} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$ ].

Modelowe parametry termiczne otoczenia budynku  $T_e(h,k), J_{(h,k)}$  można określić, korzystając z opracowań [2, 3].

3. Warunki termiczne w rozpatrywanych systemach charakteryzuje stała temperatura powietrza wewnętrznego  $T_i = \text{const}$ , przy czym  $T_i > T_{ed}$  oraz  $T_i > T_{en}$ .

4. Warunki wymiany ciepła między systemem a otoczeniem oraz w obrębie samego systemu opisują niżej wymienione, stałe i nie zależne od zmian temperatury, zastępcze opory cieplne:

$R_{ie}$  - równoważny średniemu oporowi całkowitych strat ciepła z budynku do otoczenia



$$(2.4) \quad R_{ie} = \frac{A_b}{\sum_{j=1}^u (k_{e(j)} A_{e(j)}) + \frac{\rho_p c_p \omega V_i}{3600}} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}],$$

$R_{ai}$  - równoważny oporowi wymiany ciepła między zasobnikiem a powietrzem wewnętrznym

$$(2.5) \quad R_{ai} = \begin{cases} \frac{\sum_{j=1}^w \frac{A_a(j)}{\alpha_{ai}(j)}}{A_a} & \text{w systemie zysków bezpośrednich} \\ \frac{d_a}{\lambda_a} + \frac{1}{\alpha_{ai}} & \text{w systemie zysków pośrednich} \end{cases} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}],$$

$R_{ae}$  - równoważny oporowi wymiany ciepła między zasobnikiem a powietrzem zewnętrznym

$$(2.6) \quad R_{ae} = \begin{cases} \infty & \text{w systemie zysków bezpośrednich} \\ \frac{1}{\alpha_p} + (n-1)R_s + \frac{1}{\alpha_e} & \text{w systemie zysków pośrednich} \end{cases} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}].$$

We wzorach (2.4)-(2.6) wprowadzono następujące oznaczenia:

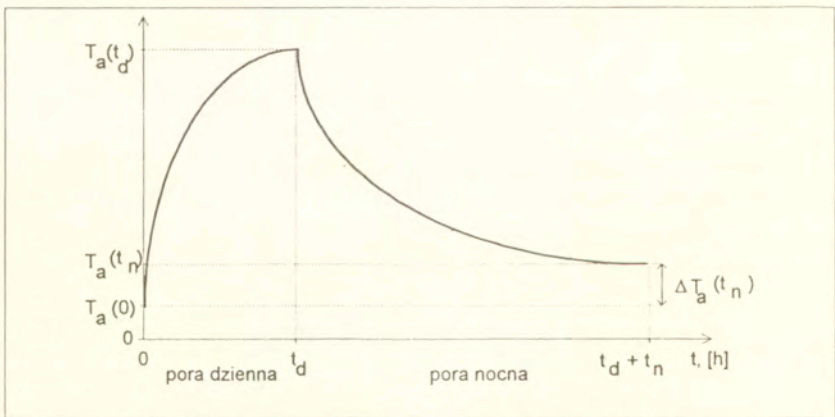
- $A_a$  - łączna powierzchnia zasobnika ciepła równa sumie powierzchni  $A_{a(j)}$  przegród budowlanych spełniających tę funkcję w systemie,  $[\text{m}^2]$ ;
- $A_b$  - łączna powierzchnia wymiany ciepła między budynkiem a otoczeniem równa sumie powierzchni  $A_{e(j)}$  wszystkich przegród zewnętrznych,  $[\text{m}^2]$ ;
- $c_p$  - ciepło właściwe powietrza,  $[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ ;
- $d_a$  - grubość zewnętrznej ściany kolektorowo-akumulacyjnej,  $[\text{m}]$ ;
- $k_{e(j)}$  - współczynnik przenikania ciepła przez  $j$ -tą przegrodę zewnętrzną,  $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$ ;
- $n$  - liczba szyb w elementach kolektorowych budynku;
- $R_s$  - opór cieplny powietrza w szczelinie między szybami,  $[\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$ ;
- $V_i$  - kubatura ogrzewanych i wentylowanych pomieszczeń w budynku,  $[\text{m}^3]$ ;
- $\alpha_{ai}$  - współczynnik przejmowania ciepła między ścianą kolektorowo-akumulacyjną i powietrzem wewnętrznym,  $[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ ;
- $\alpha_{ai(j)}$  - współczynnik przejmowania ciepła między  $j$ -tą przegrodą spełniającą funkcję zasobnika w systemie zysków bezpośrednich a powietrzem wewnętrznym,  $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$ ;
- $\alpha_e$  - współczynnik przejmowania ciepła z zewnętrznej powierzchni oszklenia elementów kolektorowych budynku,  $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$ ;
- $\alpha_p$  - współczynnik przejmowania ciepła w przestrzeni między ścianą kolektorowo-akumulacyjną a oszkleniem ochronnym,  $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$ ;
- $\lambda_a$  - Współczynnik przewodzenia ciepła przez ścianę kolektorowo-akumulacyjną,  $[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ ;

- $\omega$  - krotność wymiany powietrza w ogrzewanych pomieszczeniach, [ $\text{h}^{-1}$ ];  
 $\rho_p$  - gęstość powietrza, [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ].

Wzory określające modelowe wartości wyżej wymienionych współczynników przemowienia ciepła  $\alpha_{ai}$ ,  $\alpha_{ai(j)}$ ,  $\alpha_e$ ,  $\alpha_p$  podano w dodatku do opracowania [1].

We wzorze (1.6) pominięto opór przewodzenia ciepła przez szyby ochronne jako bardzo mały w stosunku do pozostałych. W bilansie energii pominięto pojemność cieplną powietrza oraz tych przegród budowlanych, które nie spełniają funkcji zasobnika ciepła w systemie biernego ogrzewania słonecznego.

5. Założono, że zasobnik ciepła jest ciałem na przemian nagrzewanym (w porze dziennej) i ochładzanym (w porze nocnej), zaś chwilowa temperatura  $T_a(t)$  zasobnika równa się średniej temperaturze całej warstwy akumulacyjnej i zmienia się co godzinę (rys. 2).



Rys. 2. Przebieg temperatury zasobnika ciepła w dobowym cyklu funkcjonowania systemu biernego ogrzewania słonecznego

6. W oparciu o sformułowane w pracy [4] wnioski dotyczące dobowego przebiegu procesów nagrzewania i ochładzania masywnych przegród budowlanych pod wpływem cyklicznie zmieniających się warunków termicznych otoczenia, grubość  $d_a$  aktywnej warstwy materiału zasobnika przyjęto:

- w systemie zysków bezpośrednich - jako równą połowie grubości masywnych przegród wewnętrznych między pomieszczeniami ogrzewanymi do jednakowej, stałej temperatury  $T_i$  powietrza;
- w systemie zysków pośrednich - jako równą całej grubości zewnętrznej ściany kolektoro-akumulacyjnej.



7. Równania bilansu energii w wyróżnionych elementach strukturalnych systemu, zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania pomieszczeń, składowe ilości ciepła słonecznego, a także ciepła dostarczonego przez konwencjonalne urządzenie ogrzewcze określono osobno dla pór dziennej lub nocnej oraz dla całej doby.

8. Dobowe zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania pomieszczeń przyjęto jako równe całkowitym stratom z budynku do otoczenia obliczonym bez uwzględnienia zysków ciepła słonecznego.

### 3. DOBOWY BILANS CIEPŁA W SYSTEMIE BIERNEGO OGRZEWANIA SŁONECZNEGO

#### 3.1. Równania bilansu energii powietrza wewnętrznego

W dowolnej chwili  $t$  doby równanie bilansu energii powietrza wewnętrznego w systemie biernego ogrzewania słonecznego ma postać

$$(3.1) \quad C_i \frac{dT_i}{dt} = \zeta \frac{dQ_{si}}{dt} + \frac{A_a}{R_{ai}} \Delta T_{ai}(t) + \frac{dQ_g}{dt} - \frac{A_b}{R_{ie}} \Delta T_{ie}(t) \quad [\text{W}].$$

Symbol  $C_i$  oznacza pojemność cieplną powietrza wewnętrznego o masie  $m_i$  i stałym cieple właściwym  $c_p$ , a więc

$$C_i = \frac{m_i c_p}{3600} \quad [\text{W} \cdot \text{h} \cdot \text{K}^{-1}],$$

natomiast  $Q_g$  wyraża ciepło dostarczone w ciągu doby przez grzejniki konwencjonalnego urządzenia ogrzewczego, zaś  $Q_{si}$  - ciepło słoneczne bezpośrednio ogrzewające powietrze wewnętrzne. Symbolem  $\Delta T_{ai}(t)$  oznaczono różnicę zmiennej w czasie temperatury  $T_a(t)$  zasobnika ciepła i stałej temperatury  $T_i$  powietrza wewnętrznego, natomiast symbolem  $\Delta T_{ie}(t)$  - różnicę stałej temperatury powietrza wewnętrznego i zmiennej w czasie temperatury  $T_e(t)$  otoczenia budynku, czyli

$$(3.2) \quad \Delta T_{ai}(t) = T_a(t) - T_i \quad [\text{K}],$$

$$(3.3) \quad \Delta T_{ie}(t) = T_i - T_e(t) \quad [\text{K}].$$

Ponadto wprowadzono współczynnik  $\zeta$  charakteryzujący rozważane systemy tak, że

$$(3.4) \quad \zeta = \begin{cases} 1 & \text{w systemie zysków bezpośrednich,} \\ 0 & \text{w systemie zysków pośrednich} \end{cases}$$

Przyjęto, że regulacja eksploatacyjna mocy cieplnej konwencjonalnego urządzenia ogrzewczego w pełni nadaża za zmiennym zapotrzebowaniem na ciepło, a nadmiar ciepła pozyskanego od nasłonecznienia ponad potrzeby wynikające z warunku utrzymania temperatury na wymaganym poziomie jest usuwany. Nie występuje więc przegrzewanie pomiesz-

czeń, w których przez całą dobę panuje stała temperatura  $T_i = \text{const}$  powietrza wewnętrznego. Przy tych założeniach równanie (3.1) przybiera postać

$$(3.5) \quad \zeta \frac{Q_{Si}}{dt} + \frac{A_a}{R_{ai}} \Delta T_{ai}(t) + \frac{dQ_g}{dt} - \frac{A_b}{R_{ie}} \Delta T_{ie}(t) = 0,$$

skąd strumień ciepła dostarczanego przez grzejniki

$$(3.6) \quad \frac{dQ_g}{dt} = \frac{A_b}{R_{ie}} \Delta T_{ie}(t) - \frac{A_a}{R_{ai}} \Delta T_{ai}(t) - \zeta \frac{dQ_{Si}}{dt} \quad [\text{W}].$$

Z powyższego wynika, że w modelu systemu biernego ogrzewania słonecznego zmiany strumienia ciepła dostarczanego do powietrza wewnętrznego przez konwencjonalne urządzenie ogrzewcze zależą od zmian temperatury zewnętrznej i temperatury zasobnika. W przypadku systemu zysków bezpośrednich zależą one także od zmian strumienia ciepła słonecznego  $Q_{Si}$ , ogrzewającego w porze dziennej powietrze wewnętrzne z pominięciem zasobnika.

Całkując obie strony równania (3.5) względem czasu obejmującego całą dobę przy założeniu, że poszczególne opory cieplne nie zależą od temperatury, mamy

$$(3.7) \quad Q_g = \frac{A_b}{R_{ie}} \int_{t_d+t_n} \Delta T_{ie}(t) dt - \frac{A_a}{R_{ai}} \int_{t_d+t_n} \Delta T_{ai}(t) dt - \zeta Q_{Si} \quad [\text{W}\cdot\text{h}].$$

Po uwzględnieniu wzorów opisujących średnie różnice temperatury  $\Delta T_{ie}^d$ ,  $\Delta T_{ie}^n$  powietrza wewnętrznego i zewnętrznego, odpowiednio w porach dziennej lub nocnej, a mianowicie

$$(3.8a) \quad \Delta T_{ie}^d = T_i - T_{ed} \quad [\text{K}],$$

$$(3.8b) \quad \Delta T_{ie}^n = T_i - T_{en} \quad [\text{K}],$$

równanie (3.7) przybiera postać

$$(3.9) \quad Q_g = \frac{A_b}{R_{ie}} (t_d \Delta T_{ie}^d + t_n \Delta T_{ie}^n) - \frac{A_a}{R_{ai}} \left[ \int_{t_d} \Delta T_{ai}^d(t) dt + \int_{t_n} \Delta T_{ai}^n(t) dt \right] - \zeta Q_{Si} \quad [\text{W}\cdot\text{h}].$$

Dobowe zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania  $Q_z$  przyjęto jako równe dobowym, całkowitym stratom z budynku do otoczenia obliczonym bez uwzględnienia zysków ciepła słonecznego. Można więc napisać, że

$$Q_z = \frac{A_b}{R_{ie}} \int_{t_d+t_n} \Delta T_{ie}(t) dt \quad [\text{W}\cdot\text{h}],$$

a po uwzględnieniu wyrażeń (3.8a, b)

$$(3.10) \quad Q_z = \frac{A_b}{R_{ie}} (t_d \Delta T_{ie}^d + t_n \Delta T_{ie}^n) \quad [\text{W}\cdot\text{h}]$$

Tak określone zapotrzebowanie na ciepło jest sumą ciepła  $Q_{zd}$  przypadającego na porę dzienną oraz  $Q_{zn}$  - na porę nocną, czyli

$$(3.11) \quad Q_z = Q_{zd} + Q_{zn} \quad [W \cdot h],$$

przy czym z zapisu (3.10) wynika, że

$$(3.12a) \quad Q_{zd} = \frac{A_b}{R_{ie}} t_d \Delta T_{ie}^d \quad [W \cdot h],$$

$$(3.12b) \quad Q_{zn} = \frac{A_b}{R_{ie}} t_n \Delta T_{ie}^n \quad [W \cdot h].$$

Pozyskane z energii promieniowania słonecznego ciepło  $Q_s^0$  w części  $Q_{sa}^0$  jest pochłaniane przez zasobnik (niezależnie od rodzaju systemu), a w części  $Q_{si}^0$  bezpośrednio ogrzewa powietrze wewnętrzne (tylko w systemie zysków bezpośrednich). Zatem

$$(3.13) \quad Q_s^0 = Q_{sa}^0 + \zeta Q_{si}^0 \quad [W \cdot h].$$

Składowe ilości  $Q_{sa}^0$ ,  $Q_{si}^0$  tego ciepła można więc określić następująco:

$$(3.14) \quad Q_{sa}^0 = \tau a \alpha H \quad [W \cdot h],$$

$$(3.15) \quad Q_{si}^0 = \tau (1 - a \alpha) H \quad [W \cdot h],$$

przy czym

$$H = H_1 A_c \quad [W \cdot h].$$

Przez  $A_c$  oznaczono powierzchnię oszklenia elementów kolektorowych budynku. Symbol  $\tau$  wyraża średni w porze dziennej współczynnik przepuszczania promieniowania słonecznego przez to oszklenie, natomiast  $\alpha$  jest współczynnikiem pochłaniania tego promieniowania na powierzchni przegród nieprzezroczystych, spełniających w systemie funkcję absorbera. Literą  $a$  oznaczono udział powierzchni  $A_a$  zasobnika ciepła w sumarycznej powierzchni  $A_{po}$  absorbera, zdefiniowany następująco:

$$3.16) \quad a = \begin{cases} \frac{A_a}{A_{po}} & \text{w systemie zysków bezpośrednich,} \\ 1 & \text{w systemie zysków pośrednich} \end{cases}$$

Ciepło  $Q_s$ , stanowiące tę część ciepła  $Q_s^0$ , która - wraz z określonym za pomocą wzoru (3.9) ciepłem  $Q_g$  dostarczonym przez urządzenie konwencjonalne - ogrzewa powietrze wewnętrzne do stałej temperatury  $T_i = const$ , można rozpatrywać jako sumę

$$(3.17) \quad Q_s = \zeta Q_{si} + Q_{sa} \quad [W \cdot h]$$

ciepła  $Q_{si}$ , które w systemie zysków bezpośrednich ogrzewa w porze dziennej powietrze wewnętrzne bez pośrednictwa zasobnika, czyli

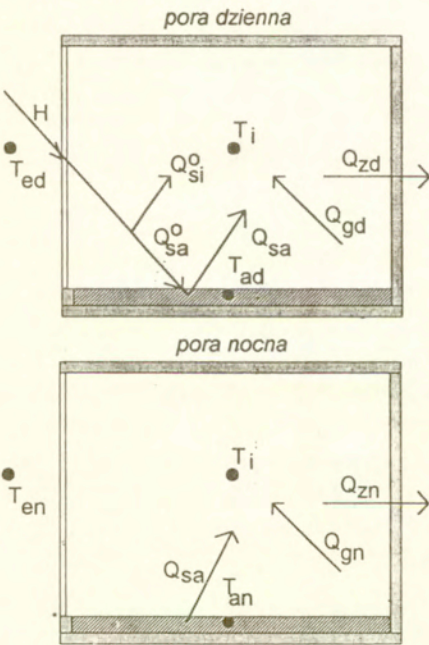


$$(3.18) \quad Q_{sl} = \tau(1-\alpha\alpha)H = Q_{sl}^0 \quad [W \cdot h]$$

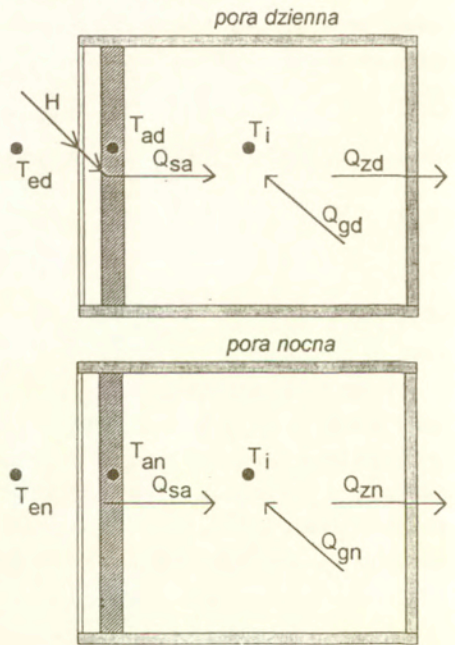
oraz ciepła  $Q_{sa}$  najpierw akumulowanego w zasobniku, a następnie przejmowanego przez powietrze wewnętrzne na drodze swobodnej konwekcji w ciągu całej doby, a więc

$$(3.19) \quad Q_{sa} = \frac{A_a}{R_{ai}} \left[ \int_{t_d} \Delta T_{ai}^d(t) dt + \int_{t_n} \Delta T_{ai}^n(t) dt \right] \quad [W \cdot h].$$

a) System zysków bezpośrednich



b) System zysków pośrednich



Rys. 3. Schematy bilansu ciepła dla powietrza wewnętrznego w systemie zysków bezpośrednich (a) i pośrednich (b) biernego ogrzewania słonecznego, w porach dziennej i nocnej

Symbolami  $\Delta T_{ai}^d(t)$ ,  $\Delta T_{ai}^n(t)$  oznaczono zmienne w czasie  $t$ , godzinowe różnice temperatury  $T_{ai}^d(t)$ ,  $T_{ai}^n(t)$  zasobnika ciepła oraz stałej temperatury  $T_i$  powietrza wewnętrznego, odpowiednio w porach dziennej lub nocnej. Zatem

$$(3.20a) \quad \Delta T_{ai}^d(t) = T_{ai}^d(t) - T_i \quad [K],$$

$$(3.20b) \quad \Delta T_{ai}^n(t) = T_{ai}^n(t) - T_i \quad [K]$$

Całe dobowe ciepło  $Q_s$  można wyrazić jako sumę

$$(3.21) \quad Q_s = Q_{sd} + Q_{sn} \quad [W \cdot h]$$

ciepła  $Q_{sd}$  przypadającego na porę dzienną oraz  $Q_{sn}$  - na porę nocną. Z porównania (3.21) do (3.17) z uwzględnieniem wyrażzeń (3.15), (3.18) i (3.19) wynika, że

$$Q_{sd} + Q_{sn} = \zeta \tau (1 - \alpha \alpha) H + \frac{A_a}{R_{ai}} \int_{t_d} \Delta T_{ai}^d(t) dt + \frac{A_a}{R_{ai}} \int_{t_n} \Delta T_{ai}^n(t) dt.$$

Na tej podstawie dochodzimy do wniosku, że

$$(3.22a) \quad Q_{sd} = \zeta \tau (1 - \alpha \alpha) H + \frac{A_a}{R_{ai}} \int_{t_d} \Delta T_{ai}^d(t) dt \quad [W \cdot h],$$

$$(3.22b) \quad Q_{sn} = \frac{A_a}{R_{ai}} \int_{t_n} \Delta T_{ai}^n(t) dt \quad [W \cdot h].$$

Po podstawieniu do (3.9) zależności (3.10) i (3.19) z uwzględnieniem (3.17) mamy, że ciepło  $Q_g$  dostarczone w ciągu doby do powietrza wewnętrznego przez konwencjonalne urządzenie ogrzewcze wynosi

$$Q_g = Q_z - Q_s \quad [W \cdot h].$$

Natomiast po uwzględnieniu wyrażzeń (3.12 a, b) i (3.22 a, b) można napisać, że

$$Q_{gd} = Q_{zd} - Q_{sd} \quad [W \cdot h],$$

$$Q_{gn} = Q_{zn} - Q_{sn} \quad [W \cdot h],$$

przy czym, na podstawie (3.11) i (3.21) wnioskujemy, że

$$Q_g = Q_{gd} + Q_{gn} \quad [W \cdot h].$$

Powyższe zależności są słuszne wtedy, gdy  $Q_s \leq Q_z$ , to jest w przypadkach, w których nie występuje przegrzewanie pomieszczeń. Jeśli  $Q_s > Q_z$ , to  $Q_g = 0$ .

Schematy bilansu ciepła dla powietrza wewnętrznego w rozważanych systemach biernego ogrzewania słonecznego pokazano na rys. 3.

### 3.2. Równania bilansu energii zasobnika ciepła

Zgodnie z przyjętymi założeniami oraz w oparciu o pokazany na rys. 4 schemat wymiany ciepła w systemie biernego ogrzewania słonecznego, równania bilansu energii zasobnika w dowolnej godzinie  $t$  doby można zapisać następująco:

- w porze dziennej

$$(3.23a) \quad C_a \frac{dT_a^d(t)}{dt} = \frac{Q_{sa}^0}{t_d} - A_a \left[ \frac{\Delta T_{ai}^d(t)}{R_{ai}} + \frac{\Delta T_{ae}^d(t)}{R_{ae}} \right] \quad [W],$$

- w porze nocnej

$$(3.23b) \quad C_a \frac{dT_a^n(t)}{dt} = -A_a \left[ \frac{\Delta T_{ai}^n(t)}{R_{ai}} + \frac{\Delta T_{ae}^n(t)}{R_{ae}} \right] \quad [W],$$

z warunkiem początkowym

$$\left[ T_a^d(t) \right]_{t=0} = T_a^d(0)$$

oraz warunkiem ciągłości temperatury zasobnika przy przejściu z pory dziennej do nocnej takim, że

$$T_a^d(t_d) = T_a^n(t_d).$$

Symbolem  $C_a$  oznaczono pojemność cieplną zasobnika o masie  $m_a$  i ciepłe właściwym  $c_a$ , czyli

$$C_a = \frac{m_a c_a}{3600} \quad [W \cdot h \cdot K^{-1}].$$

Z wyrażenia (3.14) wynika, że

$$(3.24) \quad \frac{Q_{sa}^0}{t_d} = \frac{\alpha a H}{t_d} \quad [W].$$

Różnice temperatury  $\Delta T_{ai}^d(t)$ ,  $\Delta T_{ai}^n(t)$  określono wyrażeniami (3.20 a,b). Symbole  $\Delta T_{ae}^d(t)$ ,  $\Delta T_{ae}^n(t)$  oznaczają natomiast różnice temperatury zasobnika  $T_a^d(t)$ ,  $T_a^n(t)$  i powietrza zewnętrznego  $T_{ed}$ ,  $T_{en}$  odpowiednio w porach dziennej lub nocnej, czyli

$$(3.25a) \quad \Delta T_{ae}^d(t) = T_a^d(t) - T_{ed} \quad [K],$$

$$(3.25b) \quad \Delta T_{ae}^n(t) = T_a^n(t) - T_{en} \quad [K].$$

Po podstawieniu (3.24) do (3.23 a) i rozwiązaniu równań różniczkowych (3.23 a,b) z dowolnością do warunku początkowego

$$(3.26) \quad \Delta T_{ai}^d(0) = T_a^d(0) - T_i$$

otrzymano, że:

- w porze dziennej, to jest w czasie  $t \in [0, t_d]$ ,



$$(3.27a) \quad \Delta T_{ai}^d(t) = \frac{R_{ai}}{R_{ai} + R_{ae}} \left( \frac{\tau \alpha \alpha H R_{ae}}{t_d A_a} - \Delta T_{ie}^d \right) (1 - E_t) + \Delta T_{ai}^d(0) E_t \quad [K],$$

- w porze nocnej, to jest w czasie  $t \in [t_d, t_d + t_n]$ ,

$$(3.27b) \quad \Delta T_{ai}^n(t) = \frac{R_{ai}}{R_{ai} + R_{ae}} \left[ \left( \frac{\tau \alpha \alpha H R_{ae}}{t_d A_a} - \Delta T_{ie}^d \right) (1 - E_{td}) \frac{E_t}{E_{td}} - \Delta T_{ie}^n \left( 1 - \frac{E_t}{E_{td}} \right) \right] + \Delta T_{ai}^d(0) E_t \quad [K].$$

W wyrażeniach (3.27 a,b), a także w dalszej części opracowania, wprowadzono następujące oznaczenia pomocnicze:

$$E_t = \exp\left(-\frac{t}{t_0}\right),$$

$$E_{td} = \exp\left(-\frac{t_d}{t_0}\right),$$

$$E_{tn} = \exp\left(-\frac{t_n}{t_0}\right),$$

$$E_{24} = \exp\left(-\frac{t_d + t_n}{t_0}\right) = E_{td} E_{tn}.$$

Symbol  $t_0$  określa tzw. *czas relaksacji* charakteryzujący w warunkach nie ustalonych wymianę ciepła między zasobnikiem o określonych właściwościach termofizycznych a jego otoczeniem (zewnątrznym i wewnętrznym). Po uwzględnieniu wcześniej zdefiniowanych wielkości fizycznych mamy

$$(3.28) \quad t_0 = C_a \frac{R_{ai} R_{ae}}{A_a (R_{ai} + R_{ae})} \quad [h].$$

Różnice temperatury  $\Delta T_{ie}^d$ ,  $\Delta T_{ie}^n$  są określone wzorami (2.8 a,b).

#### 4. WARUNEK PERIODYCZNOŚCI DOBOWYCH CYKLI FUNKCJONOWANIA SYSTEMU

Założono, że system biernego ogrzewania słonecznego funkcjonuje cyklicznie w każdym dowolnie wybranym miesiącu sezonu ogrzewczego. Przyjęto, że dowolna doba tego miesiąca charakteryzuje się identycznymi warunkami termicznymi, wyrażonymi przez parametry  $T_{ed}$ ,  $T_{en}$ ,  $H_1$ ,  $t_d$ ,  $t_n$  określone wzorami (2.1 a,b)-(2.3 a,b).

Zgodnie z wyrażeniami (3.27 a,b), różnice temperatury  $\Delta T_{ai}^d(t)_{(k)}$ ,  $\Delta T_{ai}^n(t)_{(k)}$  w dowolnej godzinie  $t$  pory dziennej lub nocnej  $k$ -tej doby rozpatrywanego miesiąca wynoszą

$$(4.1a) \quad \Delta T_{ai}^d(t)_{(k)} = \Delta T_{ai}^d(t)_{(0)} + E_t \Delta T_{ai}^d(0)_{(k)} \quad [K],$$

$$(4.1b) \quad \Delta T_{ai}^n(t)_{(k)} = \Delta T_{ai}^n(t)_{(0)} + E_t \Delta T_{ai}^d(0)_{(k)} \quad [K],$$

dla  $k=1, \dots, m$ , przy czym

$$(4.2a) \quad \Delta T_{ai}^d(t)_{(0)} = \frac{R_{ai}}{R_{ai} + R_{ae}} \left( \frac{\alpha a H}{t_d} \frac{R_{ae}}{A_a} - \Delta T_{ie}^d \right) (1 - E_t) \quad [K],$$

$$(4.2b) \quad \Delta T_{ai}^n(t)_{(0)} = \frac{R_{ai}}{R_{ai} + R_{ae}} \left( \frac{\alpha a H}{t_d} \frac{R_{ae}}{A_a} - \Delta T_{ie}^d \right) (1 - E_{td}) \frac{E_t}{E_{td}} - \frac{R_{ai}}{R_{ai} + R_{ae}} \left( 1 - \frac{E_t}{E_{td}} \right) \quad [K].$$

Na podstawie warunku ciągłości temperatury zasobnika przy przejściu z  $(k-1)$  do  $k$ -tej doby, wyrażonego równością

$$\Delta T_{ai}^n(24)_{(k-1)} = \Delta T_{ai}^d(0)_{(k)} \quad \text{dla } k = 2, \dots, m-1,$$

w odniesieniu do drugiej doby miesiąca mamy, że

$$\Delta T_{ai}^d(0)_{(2)} = \Delta T_{ai}^n(24)_{(0)} + \Delta T_{ai}^d(0)_{(1)} E_{24}.$$

W podobny sposób, na podstawie warunku ciągłości oraz wzorów (4.1 a,b), znajduje się wyrażenie określające różnicę  $\Delta T_{ai}^d(0)_{(k)}$  temperatury zasobnika ciepła i powietrza wewnętrznego na początku  $k$ -tej doby danego miesiąca, czyli

$$\Delta T_{ai}^d(0)_{(k)} = \Delta T_{ai}^n(24)_{(0)} \frac{1}{E_{24}} \left( \sum_{r=1}^k E_{24}^{r-1} - 1 \right) + \Delta T_{ai}^d(0)_{(0)} E_{24}^{k-1}.$$

Ponieważ suma postępu geometrycznego

$$\sum_{r=1}^k E_{24}^{r-1} = \frac{1 - E_{24}^k}{1 - E_{24}},$$

to powyższe wyrażenie można zapisać w postaci

$$(4.3) \quad \Delta T_{ai}^d(0)_{(k)} = \Delta T_{24}^n(24)_{(0)} \frac{1}{1 - E_{24}} + \left[ \Delta T_{ai}^d(0)_{(1)} - \frac{1}{1 - E_{24}} \Delta T_{ai}^n(24)_{(0)} \right] E_{24}^{k-1}$$

dla  $k=2, \dots, m-1$ .

Po podstawieniu (4.3) do wyrażeń (4.1 a,b) otrzymuje się, że w dowolnej godzinie  $t$  każdej doby różnice temperatury zasobnika ciepła i powietrza wewnętrznego odpowiednio wynoszą

$$(4.4a) \quad \Delta T_{ai}^d(t)_{(k)} = \Delta T_{ai}^d(t)_{(0)} + \frac{E_t}{1-E_{24}} \Delta T_{ai}^n(24)_{(0)} + \\ + E_t E_{24}^{k-1} \left[ \Delta T_{ai}^d(0)_{(1)} - \frac{1}{1-E_{24}} \Delta T_{ai}^n(24)_{(0)} \right],$$

$$(4.4b) \quad \Delta T_{ai}^n(t)_{(k)} = \Delta T_{ai}^n(t)_{(0)} + \frac{E_t}{1-E_{24}} \Delta T_{ai}^n(24)_{(0)} + \\ + E_t E_{24}^{k-1} \left[ \Delta T_{ai}^d(0)_{(1)} - \frac{1}{1-E_{24}} \Delta T_{ai}^n(24)_{(0)} \right].$$

Ponieważ, zgodnie z założeniem o cykliczności funkcjonowania systemu w rozpatrywanym miesiącu, różnice temperatury  $\Delta T_{ai}^d(t)_{(k)}$ ,  $\Delta T_{ai}^n(t)_{(k)}$  nie zależą od tego, w której  $k$ -tej dobie są rozpatrywane, przeto wyrażenia w nawiasach powinny zniknąć. Stąd też dochodzi się do wniosku, że różnica temperatury zasobnika ciepła i powietrza wewnętrznego na początku pierwszej doby

$$\Delta T_{ai}^d(0)_{(1)} = \frac{\Delta T_{ai}^n(24)_{(0)}}{1-E_{24}}$$

Zatem wyrażenia (3.4 a,b) przybierają postaci:

$$(4.6a) \quad \Delta T_{ai}^d(t)_{(k)} = \Delta T_{ai}^d(t)_{(0)} + \frac{E_t}{1-E_{24}} \Delta T_{ai}^n(24)_{(0)},$$

$$(4.6b) \quad \Delta T_{ai}^n(t)_{(k)} = \Delta T_{ai}^n(t)_{(0)} + \frac{E_t}{1-E_{24}} \Delta T_{ai}^n(24)_{(0)},$$

z których wynika, że

$$(4.7a) \quad \Delta T_{ai}^d(0)_{(k)} = \Delta T_{ai}^d(0)_{(0)} + \frac{1}{1-E_{24}} \Delta T_{ai}^n(24)_{(0)},$$

$$(4.7b) \quad \Delta T_{ai}^n(24)_{(k)} = \Delta T_{ai}^n(24)_{(0)} + \frac{E_{24}}{1-E_{24}} \Delta T_{ai}^n(24)_{(0)}.$$

Po uwzględnieniu - na podstawie (4.2a) - znikania  $\Delta T_{ai}^d(0)_{(0)} = 0$ , otrzymuje się warunki periodyczności

$$\Delta T_{ai}^d(0)_{(k)} = \Delta T_{ai}^n(24)_{(k)}$$

cykli dobowych w odniesieniu do dowolnego miesiąca sezonu ogrzewczego.



Po podstawieniu do (4.5) wyrażenia (3.2 b) określonego dla  $t=24$ , otrzymano

$$(4.8) \quad \Delta T_{ai}^d(0)_{(1)} = \frac{1}{1-E_{24}} \frac{R_{ai}}{R_{ai} + R_{ae}} \left( \frac{\alpha c H R_{ae}}{t_d A_d} - \Delta T_{ie}^d \right) (1-E_{id}) E_{in} - \frac{1}{1-E_{24}} \frac{R_{ai}}{R_{ai} + R_{ae}} \Delta T_{ie}^n (1-E_{in}) \quad [K]$$

## 5. STANY TERMICZNE ZASOBNIKA CIEPŁA

Dla dowolnej  $k$ -tej doby w dowolnym miesiącu sezonu ogrzewczego określimy ciepło  $Q_a$  zakumulowane w przegrodach budowlanych spełniających w rozważanych systemach funkcję zasobnika ciepła. Ciepło to można rozpatrywać jako sumę

$$(5.1) \quad Q_a = Q_{ad}(k) + Q_{an}(k) \quad [W \cdot h]$$

ciepła  $Q_{ad}(k)$  zaabsorbowanego w porze dziennej oraz ciepła  $Q_{an}(k)$  pozostającego w zasobniku na końcu pory nocnej  $k$ -tej doby. Wymienione składowe ilości ciepła wynoszą

$$(5.2a) \quad Q_{ad}(k) = C_a \int_{t_d} \frac{dT_a^d(t)}{dt} dt = C_a \left[ T_a^d(t_d)_{(k)} - T_a^d(0)_{(k)} \right],$$

$$(5.2b) \quad Q_{an}(k) = C_a \int_{t_n} \frac{dT_a^n(t)}{dt} dt = C_a \left[ T_a^n(t_d + t_n)_{(k)} - T_a^d(t_d)_{(k)} \right].$$

Uwzględniając oznaczenia (3.20 a,b), (3.26) oraz warunek ciągłości temperatury zasobnika przy przejściu z pory dziennej do nocnej, równania (5.2 a,b), (5.1) można zapisać następująco:

$$(5.3a) \quad Q_{ad}(k) = C_a \left[ \Delta T_{ai}^d(t_d)_{(k)} - \Delta T_{ai}^d(0)_{(k)} \right] \quad [W \cdot h]$$

$$(5.3b) \quad Q_{an}(k) = C_a \left[ \Delta T_{ai}^n(t_d + t_n)_{(k)} - \Delta T_{ai}^d(t_d)_{(k)} \right] \quad [W \cdot h],$$

$$(5.4) \quad Q_a = C_a \left[ \Delta T_{ai}^n(t_d + t_n)_{(k)} - \Delta T_{ai}^d(0)_{(k)} \right] \quad [W \cdot h].$$

Natomiast po podstawieniu za  $\Delta T_{ai}^d(t_d)$ ,  $\Delta T_{ai}^n(t_d + t_n)$  wyrażeń (3.27 a,b), odpowiednio dla  $t=t_d$  oraz  $t=t_d+t_n$ , a także po określeniu z (3.28), że

$$C_a = \frac{A_a (R_{ai} + R_{ae})}{R_{ai} R_{ae}} t_0$$

i uwzględnieniu założenia o cykliczności funkcjonowania systemu w rozpatrywanym miesiącu, mamy

$$Q_{ad} = \left[ \frac{A_a}{R_{ae}} t_0 \left( \frac{\alpha a c H}{t_d} \frac{R_{ae}}{A_a} - \Delta T_{ie}^d \right) - C_a \Delta T_{ai}^d(0)_{(1)} \right] (1 - E_{td}),$$

$$Q_{an} = - \left\{ \frac{A_a}{R_{ae}} t_0 \left[ \left( \frac{\alpha a c H}{t_d} \frac{R_{ae}}{A_a} - \Delta T_{ie}^d \right) (1 - E_{td}) + \Delta T_{ie}^n \right] + C_a \Delta T_{ai}^d(0)_{(1)} E_{td} \right\} (1 - E_m),$$

$$Q_a = \frac{A_a}{R_{ae}} t_0 \left[ \left( \frac{\alpha a c H}{t_d} \frac{R_{ae}}{A_a} - \Delta T_{ie}^d \right) (1 - E_{td}) E_m - \Delta T_{ie}^n (1 - E_m) \right] - C_a \Delta T_{ai}^d(0)_{(1)} (1 - E_{24}).$$

Po podstawieniu w powyższych wyrażeniach wzoru (4.8) określającego  $\Delta T_{ai}^d(0)_{(1)}$  oraz uporządkowaniu składników, otrzymano ostatecznie, że

$$(5.5a) \quad Q_{ad} = \left[ \frac{\alpha a c H}{t_d} - \frac{A_a}{R_{ae}} (\Delta T_{ie}^d - \Delta T_{ie}^n) \right] t_0 E \quad [W \cdot h],$$

$$(5.5b) \quad Q_{an} = - \left[ \frac{\alpha a c H}{t_d} - \frac{A_a}{R_{ae}} (\Delta T_{ie}^d - \Delta T_{ie}^n) \right] t_0 E \quad [W \cdot h],$$

$$(5.6) \quad Q_a = 0.$$

Z powyższego wynika, że - przy założeniu cykliczności funkcjonowania systemu biernego ogrzewania słonecznego w dowolnym miesiącu sezonu ogrzewczego - całkowite "rozładowanie" zasobnika ciepła następuje w chwili  $t = t_d + t_n$ , to jest w ostatniej godzinie każdej doby. Zatem w chwili początkowej  $t=0$  każdej następnej doby w zasobniku nie ma ciepła nie wykorzystanego poprzednio. Stąd wnioskujemy, że w sformułowanym tu modelu systemów biernego ogrzewania słonecznego całe ciepło  $Q_s$ , określone wyrażeniem (3.17), jest ciepłem wykorzystanym do ogrzewania pomieszczeń.

## 6. CIEPŁO SŁONECZNE WYKORZYSTANE DO OGRZEWANIA POMIESZCZEŃ

Po podstawieniu (3.27a) do (3.22a) otrzymuje się, że w dowolnej  $k$ -tej dobie miesiąca

$$(6.1a) \quad Q_{sd} = \frac{A_a}{R_{ai}} \int_{t_d}^{\tau} \left[ \frac{R_{ai}}{R_{ai} + R_{ae}} \left( \frac{\alpha a c H}{t_d} \frac{R_{ae}}{A_a} - \Delta T_{ie}^d \right) (1 - E_t) + \Delta T_{ai}^d(0)_{(1)} E_t \right] dt,$$

a po podstawieniu (3.27b) do (3.22b) - że

$$(6.1b) \quad Q_{sn} = \frac{A_a}{R_{ai} + R_{ae}} \int_{t_n}^{\tau \alpha d H} \left( \frac{R_{ae}}{t_d} \frac{R_{ae}}{A_a} - \Delta T_{ie}^d \right) (1 - E_{td}) \frac{E_t}{E_{td}} dt - \\ - \frac{A_a}{R_{ai} + R_{ae}} \int_{t_n}^{\tau \alpha d H} \Delta T_{ie}^n \left( 1 - \frac{E_t}{E_{td}} \right) dt + \frac{A_a}{R_{ai}} \int_{t_n}^{\tau \alpha d H} \Delta T_{ai}^d(0)_{(1)} E_t dt$$

Ponieważ

$$\int_{t_d}^{t_d} E_t dt = \int_0^{t_d} E_t dt = t_0 (1 - E_{td}), \\ \int_{t_n}^{t_d+t_n} E_t dt = \int_{t_d}^{t_d+t_n} E_t dt = t_0 (1 - E_{tn}), \\ \int_{t_d} (1 - E_t) dt = t_d \left[ 1 - \frac{t_0}{t_d} (1 - E_{td}) \right], \\ \int_{t_n} (1 - E_t) dt = t_n \left[ 1 - \frac{t_0}{t_n} (1 - E_{tn}) \right],$$

to po wykonaniu całkowania i przekształceń algebraicznych otrzymano następujące wyrażenia określające składowe ilości ciepła słonecznego, które - wraz z ciepłem dostarczanym przez grzejniki konwencjonalnego urządzenia ogrzewczego - ogrzewają powietrze wewnętrzne do stałej temperatury  $T_i = \text{const}$  w porach dziennej i nocnej:

$$(6.2a) \quad Q_{sd} = \zeta \tau (1 - \alpha \alpha) H + \\ + \frac{A_a}{R_{ai} + R_{ae}} t_d \left( \frac{\tau \alpha d H}{t_d} \frac{R_{ae}}{A_a} - \Delta T_{ie}^d \right) \left[ 1 - \frac{t_0}{t_d} (1 - E_{td}) \right] + \quad [W \cdot h], \\ + \frac{A_a}{R_{ai}} \Delta T_{ai}^d(0)_{(1)} t_0 (1 - E_{td})$$

$$(6.2b) \quad Q_{sn} = \frac{A_a}{R_{ai} + R_{ae}} t_0 \left( \frac{\tau \alpha d H}{t_d} \frac{R_{ae}}{A_a} - \Delta T_{ie}^d \right) (1 - E_{td}) (1 - E_{tn}) - \\ - \frac{A_a}{R_{ai} + R_{ae}} \Delta T_{ie}^n t_n \left[ 1 - \frac{t_0}{t_n} (1 - E_{tn}) \right] + \quad [W \cdot h], \\ + \frac{A_a}{R_{ai}} \Delta T_{ai}^d(0)_{(1)} t_0 E_{td} (1 - E_{tn})$$

Podstawiając do wzorów (6.2 a,b) wyrażenie (4.8), po przekształceniach algebraicznych i uporządkowaniu znajdujemy ostatecznie, że



$$(6.3a) \quad Q_{sd} = \zeta\tau(1-\alpha)H + \tau\alpha cH \frac{R_{ae}}{R_{ai} + R_{ae}} \left(1 - \frac{t_0}{t_d} E\right) - \frac{A_a}{R_{ai} + R_{ae}} \left[ t_d \Delta T_{ie}^d \left(1 - \frac{t_0}{t_d} E\right) + t_0 \Delta T_{ie}^n E \right] \quad [W \cdot h],$$

$$(6.3b) \quad Q_{sn} = \tau\alpha cH \frac{R_{ae}}{R_{ai} + R_{ae}} \frac{t_0}{t_d} E - \frac{A_a}{R_{ai} + R_{ae}} \left[ t_0 \Delta T_{ie}^d + t_n \Delta T_{ie}^n \left(1 - \frac{t_0}{t_n} E\right) \right] \quad [W \cdot h].$$

W wyrażeniach (6.3 a,b) i dalszych wprowadzono oznaczenie pomocnicze

$$E = \frac{(1 - E_{td})(1 - E_{tn})}{1 - E_{24}}.$$

Po dodaniu stronami zależności (6.3 a,b) i uwzględnieniu (3.21) otrzymano, że ciepło słoneczne  $Q_s$ , wykorzystane w ciągu całej doby do ogrzewania powietrza wewnętrznego, wynosi

$$(6.4) \quad Q_s = \zeta\tau(1-\alpha)H + \frac{A_a}{R_{ai} + R_{ae}} \left( \tau\alpha cH \frac{R_{ae}}{A_a} - t_d \Delta T_{ie}^d - t_n \Delta T_{ie}^n \right) \quad [W \cdot h].$$

Z kolei, po podstawieniu (3.14) i (3.15) do sumy (3.13), pozyskane z energii promieniowania słonecznego ciepło  $Q_s^0$  wynosi

$$(6.5) \quad Q_s^0 = \zeta\tau(1-\alpha)H + \tau\alpha cH \quad [W \cdot h].$$

Po wyznaczeniu  $\zeta\tau(1-\alpha)H$  osobno z obu wzorów (6.4) i (6.5), porównaniu stronami i przekształceniach algebraicznych otrzymuje się następującą zależność między ciepłem  $Q_s$  a  $Q_s^0$ :

$$(6.6) \quad Q_s = Q_s^0 - \left[ \tau\alpha cH \frac{R_{ai}}{R_{ai} + R_{ae}} + \frac{A_a}{R_{ai} + R_{ae}} (t_d \Delta T_{ie}^d + t_n \Delta T_{ie}^n) \right] \quad [W \cdot h].$$

Uwzględniając wzory (2.6), (3.4) i (3.16), wyrażenia (6.3 a,b) można zapisać osobno dla obu rozważanych w niniejszym opracowaniu rodzajów biernego ogrzewania słonecznego, to jest dla systemów zysków bezpośrednich lub pośrednich.

W przypadku systemu zysków bezpośrednich, w którym z założenia  $\zeta=1$ , zaś  $R_{ae}=\infty$ , składowe ilości ciepła słonecznego - dzienna  $Q_{sd}^{ZB}$  i nocna  $Q_{sn}^{ZB}$  - odpowiednio wynoszą

$$(6.7a) \quad Q_{sd}^{ZB} = \tau H \left( 1 - \alpha \alpha \frac{t_0}{t_d} E \right) \quad [W \cdot h],$$

$$(6.7b) \quad Q_{sn}^{ZB} = \tau \alpha H \frac{t_0}{t_d} E \quad [W \cdot h].$$

Natomiast w przypadku systemu zysków pośrednich, w którym z kolei  $\zeta=0$  oraz  $\alpha=1$ , analogiczne składowe ilości ciepła słonecznego - dzienna  $Q_{sd}^{ZP}$  i nocna  $Q_{sn}^{ZP}$  - wynoszą

$$(6.8a) \quad Q_{sd}^{ZP} = \tau \alpha H \frac{R_{ae}}{R_{ai} + R_{ae}} \left( 1 - \frac{t_0}{t_d} E \right) - \frac{A_a}{R_{ai} + R_{ae}} \left[ \Delta T_{ie}^d (t_d - t_0 E) + \Delta T_{ie}^n t_0 E \right] \quad [W \cdot h],$$

$$(6.8b) \quad Q_{sn}^{ZP} = \tau \alpha H \frac{R_{ae}}{R_{ai} + R_{ae}} \frac{t_0}{t_d} E - \frac{A_a}{R_{ai} + R_{ae}} \left[ \Delta T_{ie}^d t_0 E + \Delta T_{ie}^n (t_n - t_0 E) \right] \quad [W \cdot h].$$

Zwraca się uwagę, iż wyrażenia (6.8 a,b) różnią się od swoich odpowiedników wypracowanych w monografii [1]. Pominięto tam bowiem człony wyznaczające straty ciepła na drodze przenikania przez ścianę kolektorowo-akumulacyjną, czyli odpowiednio

$$\frac{A_a}{R_{ai} + R_{ae}} \left[ \Delta T_{ie}^d (t_d - t_0 E) + \Delta T_{ie}^n t_0 E \right]$$

w porze dziennej oraz

$$\frac{A_a}{R_{ai} + R_{ae}} \left[ \Delta T_{ie}^d t_0 E + \Delta T_{ie}^n (t_n - t_0 E) \right]$$

w porze nocnej. Dotyczy to również opracowań [5, 6, 7], których autorzy w ten sam sposób interpretowali zyski ciepła w systemie biernego ogrzewania słonecznego.

Po uwzględnieniu wzorów (2.6), (3.4) i (3.16) w zależności (6.6), otrzymano następujące wyrażenia określające ciepło słoneczne  $Q_s^{ZB}$ ,  $Q_s^{ZP}$  wykorzystane do ogrzewania pomieszczeń w ciągu całej doby, odpowiednio w systemach zysków bezpośrednich lub pośrednich:

$$(6.9) \quad Q_s^{ZB} = Q_s^0 \quad [W \cdot h],$$

$$(6.10) \quad Q_s^{ZP} = Q_s^0 - \left[ \tau \alpha H \frac{R_{ai}}{R_{ai} + R_{ae}} + \frac{A_a}{R_{ai} + R_{ae}} (t_d \Delta T_{ie}^d + t_n \Delta T_{ie}^n) \right] \quad [W \cdot h].$$

Ponieważ z równania (6.5) - po odpowiednim podstawieniu wzorów (3.4) i (3.16) - mamy, że

- w systemie zysków bezpośrednich

$$(Q_s^0)^{ZB} = \tau H,$$

- w systemie zysków pośrednich

$$(Q_s^0)^{ZP} = \tau \alpha H,$$

to po uwzględnieniu powyższych równości w wyrażeniach (6.9) i (6.10) otrzymano ostatecznie, że

$$(6.11) \quad Q_s^{ZB} = \tau H \quad [W \cdot h],$$

$$(6.12) \quad Q_s^{ZP} = \tau \alpha H \frac{R_{ae}}{R_{ai} + R_{ae}} - \frac{A_a}{R_{ai} + R_{ae}} (t_d \Delta T_{ie}^d + t_n \Delta T_{ie}^n) \quad [W \cdot h].$$

Z otrzymanych zależności (6.9)-(6.12) wynikają następujące wnioski:

1. W przypadku systemu zysków bezpośrednich całe ciepło  $(Q_s^0)^{ZB}$ , pozyskane z konwersji termicznej energii promieniowania słonecznego, jest wykorzystane w ciągu doby do ogrzewania pomieszczeń. Wynika to z założenia, iż zasobnik (masywne przegrody wewnętrzne) nie traci ciepła bezpośrednio do otoczenia budynku. Fakt ten uwzględniono we wzorze (2.6), przyjmując w nim  $R_{ae} = \infty$  dla tego systemu.

2. W przypadku systemu zysków pośrednich, wyrażone wzorem (6.10) ciepło  $Q_s^{ZP}$ , wykorzystane w ciągu doby do ogrzewania pomieszczeń, jest mniejsze od wyżej określonego ciepła  $(Q_s^0)^{ZP}$  o wielkość

$$\tau \alpha H \frac{R_{ai}}{R_{ai} + R_{ae}}$$

zależną od wartości ilorazu

$$(6.13) \quad r_i = \frac{R_{ai}}{R_{ai} + R_{ae}}$$

oraz o wielkość

$$\frac{A_a}{R_{ai} + R_{ae}} (t_d \Delta T_{ie}^d + t_n \Delta T_{ie}^n)$$

wyrażającą dobowe straty ciepła przenikającego przez ścianę kolektorowo-akumulacyjną do otoczenia budynku. Natomiast na samo ciepło  $Q_s^{ZP}$  wpływa wielkość



$$\tau_{cd}H \frac{R_{ae}}{R_{ai} + R_{ae}}$$

zależna z kolei od wartości ilorazu

$$(6.14) \quad r_e = \frac{R_{ae}}{R_{ai} + R_{ae}}$$

oraz od wymienionych uprzednio strat, o czym wnioskujemy na podstawie zapisu (6.12).

Zwraca się uwagę, że określone formułami (6.13), (6.14) udziały  $r_i$ ,  $r_e$  oporów cieplnych  $R_{ai}$ ,  $R_{ae}$  zasobnika w stosunku do ich sumy  $R_{ai} + R_{ae}$ , są równoważne pojęciom "współczynników podziału" wprowadzonym w opracowaniu [8] przy sformułowaniu równań bilansu ciepła dla prostych systemów heliogrzewczych.

3. Korzystne jest stworzenie takich warunków wymiany ciepła między zasobnikiem a powietrzem wewnętrznym i zewnętrznym w systemie zysków pośrednich, aby iloraz  $r_i$  dążył do jedności, zaś  $r_e$  do zera. Wartość  $r_i$  jest tym bliższa jedności, a wartość  $r_e$  tym bliższa zeru, im większy jest opór  $R_{ae}$  oddawania ciepła z zasobnika do powietrza zewnętrznego. W skrajnym przypadku, gdy  $R_{ae} \rightarrow \infty$ , to ze wzorów (6.9) i (6.10) wynika, że ciepło  $Q_s^{ZP} \rightarrow Q_s^{ZB}$ . Może to być wskazówką do optymalizacji ścian kolektorowo-akumulacyjnych.

## 7. MIERNIKI EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ

Przy założeniu, że energia całkowitego promieniowania słonecznego, padającego na oszklecie elementów kolektorowych budynku  $H > 0$ , przyjęto niżej zdefiniowane, bezwymiarowe mierniki dobowej efektywności energetycznej systemów biernego ogrzewania słonecznego.

1. *Współczynnik sprawności pozyskiwania ciepła*  $\eta_0$  wyrażający stosunek ciepła  $Q_s^0$  do wymienionej wyżej energii  $H$ , czyli

$$(7.1) \quad \eta_0 = \frac{\text{def } Q_s^0}{H}$$

2. *Wskaźniki użytecznych zysków ciepła od nasłonecznienia*  $\varphi_d$ ,  $\varphi_n$ ,  $\varphi$  określające wielkości udziałów ciepła słonecznego  $Q_{sd}$ ,  $Q_{sn}$ ,  $Q_s$  w pokryciu zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania, odpowiednio  $Q_{zd}$ ,  $Q_{zn}$ ,  $Q_z$ , w porach dziennej, nocnej lub w ciągu całej doby przy niewystępowaniu przegrzewania pomieszczeń. Przegrzewanie pomieszczeń występuje wtedy, gdy temperatura powietrza wewnętrznego przekracza wartość  $T_i$  mimo znikania strumienia ciepła dostarczanego przez grzejniki konwencjonalnego urządzenia ogrzewczego, to jest jeśli  $dQ_g/dt=0$ . W tym przypadku przyjęto wskaźniki  $\varphi_d$ ,  $\varphi_n$ ,  $\varphi$  za równe jedności.

Zgodnie z powyższym, wskaźniki użytecznych zysków ciepła od nasłonecznienia zdefiniowano w następujący sposób:

$$(7.2a) \quad \varphi_d = \begin{cases} \frac{Q_{sd}}{Q_{zd}} & \text{gdy } Q_{sd} \leq Q_{zd}, \\ 1 & \text{gdy } Q_{sd} > Q_{zd}, \end{cases}$$

$$(7.2b) \quad \varphi_n = \begin{cases} \frac{Q_{sn}}{Q_{zn}} & \text{gdy } Q_{sn} \leq Q_{zn}, \\ 1 & \text{gdy } Q_{sn} > Q_{zn}, \end{cases}$$

$$(7.3) \quad \varphi = \begin{cases} \frac{Q_s}{Q_z} & \text{gdy } Q_s \leq Q_z, \\ 1 & \text{gdy } Q_s > Q_z. \end{cases}$$

Zapotrzebowanie na ciepło  $Q_{zd}$ ,  $Q_{zn}$ ,  $Q_z$ , odpowiednio w porach dziennej, nocnej i w skali całej doby, określają wyrażenia (3.11) i (3.12 a,b). Ciepło słoneczne  $Q_{sd}$ ,  $Q_{sn}$ ,  $Q_s$ , odnoszące się do tych przedziałów czasu, określają wyrażenia (6.3 a,b) i (6.4).

Po podstawieniu równania (3.13) do wzoru (7.1) oraz uwzględnieniu wyrażen (3.14) i (3.15), określających ciepło  $Q_{si}^0$  ogrzewające bezpośrednio powietrze wewnętrzne i  $Q_{sa}^0$  pochłaniane przez zasobnik, otrzymano, że

$$(7.4) \quad \eta_0 = \tau[\zeta - (\zeta - 1)\alpha].$$

Stąd, w myśl warunków (3.4) i (3.16), współczynniki sprawności pozyskiwania ciepła:  $\eta_0^{ZB}$  w systemie zysków bezpośrednich i  $\eta_0^{ZP}$  w systemie zysków pośrednich, odpowiednio wynoszą

$$(7.5) \quad \eta_0^{ZB} = \tau,$$

$$(7.6) \quad \eta_0^{ZP} = \tau\alpha.$$

Przechodząc do dyskusji dotyczącej współczynników  $\varphi_d$ ,  $\varphi_n$ ,  $\varphi$ , wprowadzono funkcję Heaviside'a  $\chi(\xi-1)$  argumentu  $\xi$  o własnościach takich, że

$$\chi(\xi-1) = \begin{cases} 0 & \text{gdy } \xi < 1, \\ 0,5 & \text{gdy } \xi = 1, \\ 1 & \text{gdy } \xi > 1. \end{cases}$$

Przy jej pomocy wyrażenia (7.2 a,b), (7.3) można zapisać w następujących postaciach:

$$(7.7a) \quad \varphi_d = \frac{Q_{sd}}{Q_{zd}} + \left(1 - \frac{Q_{sd}}{Q_{zd}}\right)\chi\left(\frac{Q_{sd}}{Q_{zd}} - 1\right),$$

$$(7.7b) \quad \varphi_n = \frac{Q_{sn}}{Q_{zn}} + \left(1 - \frac{Q_{sn}}{Q_{zn}}\right) \chi \left(\frac{Q_{sn}}{Q_{zn}} - 1\right),$$

$$(7.8) \quad \varphi = \frac{Q_s}{Q_z} + \left(1 - \frac{Q_s}{Q_z}\right) \chi \left(\frac{Q_s}{Q_z} - 1\right).$$

Do dalszych rozważań wprowadzono nowe zmienne  $\eta_d$ ,  $\eta_n$ ,  $\eta$  związane z wielkościami  $Q_{sd}$ ,  $Q_{sn}$ ,  $Q_s$ ,  $Q_{zd}$ ,  $Q_{zn}$ ,  $Q_z$  następująco:

$$(7.9a) \quad \frac{Q_{sd}}{Q_{zd}} \stackrel{def}{=} \eta_d \psi,$$

$$(7.9b) \quad \frac{Q_{sn}}{Q_{zn}} \stackrel{def}{=} \eta_n \psi,$$

$$(7.10) \quad \frac{Q_s}{Q_z} \stackrel{def}{=} \eta \psi.$$

przy czym

$$(7.11) \quad \psi \stackrel{def}{=} \frac{H}{Q_z}.$$

Po podstawieniu wyrażeń (6.3 a,b) odpowiednio do przekształconych wzorów (7.9 a,b) i uwzględnieniu (7.11) mamy

$$(7.12a) \quad \eta_d = \frac{Q_z}{Q_{zd}} \left[ \zeta \tau (1 - \alpha \alpha) + \tau \alpha \frac{R_{ae}}{R_{ai} + R_{ae}} \right] \left( 1 - \frac{t_0}{t_d} E \right) - \frac{Q_z}{Q_{zd}} \frac{A_a}{H(R_{ai} + R_{ae})} \left[ t_d \Delta T_{ie}^d \left( 1 - \frac{t_0}{t_d} E \right) + t_0 \Delta T_{ie}^n E \right],$$

$$(7.12b) \quad \eta_n = \frac{Q_z}{Q_{zn}} \tau \alpha \frac{t_0}{t_d} \frac{R_{ae}}{R_{ai} + R_{ae}} - \frac{Q_z}{Q_{zn}} \frac{A_a}{H(R_{ai} + R_{ae})} \left[ t_0 \Delta T_{ie}^d E + t_n \Delta T_{ie}^n \left( 1 - \frac{t_0}{t_n} E \right) \right]$$

Wobec zachodzącej równości (3.21), na podstawie wzorów (7.9 a,b) i (7.10) otrzymano równanie

$$(7.13) \quad \eta = \eta_d \frac{Q_{zd}}{Q_z} + \eta_n \frac{Q_{zn}}{Q_z}.$$

Po uwzględnieniu wskazanych wyżej związków między zmiennymi  $\eta_d$ ,  $\eta_n$ ,  $\eta$  a ciepłem słonecznym  $Q_{sd}$ ,  $Q_{sn}$ ,  $Q_s$  oraz zapotrzebowaniem na ciepło do ogrzewania  $Q_{zd}$ ,  $Q_{zn}$ ,  $Q_z$ , wyrażenia (7.7 a,b) i (7.8) można przepisać w poniższych równoważnych postaciach:



$$(7.14a) \quad \varphi_d = \eta_d \psi + (1 - \eta_d \psi) \chi \left( \frac{Q_{sd}}{Q_{zd}} - 1 \right),$$

$$(7.14b) \quad \varphi_n = \eta_n \psi + (1 - \eta_n \psi) \chi \left( \frac{Q_{sn}}{Q_{zn}} - 1 \right),$$

$$(7.15) \quad \varphi = \eta \psi + (1 - \eta \psi) \chi \left( \frac{Q_s}{Q_z} - 1 \right).$$

Mnożąc obie strony wyrażenia (7.14a) przez iloraz  $Q_{zd}/Q_z$ , a obie strony wyrażenia (7.14b) przez iloraz  $Q_{zn}/Q_z$ , mamy

$$(7.16a) \quad \varphi_d \frac{Q_{zd}}{Q_z} = \eta_d \psi \frac{Q_{zd}}{Q_z} + (1 - \eta_d \psi) \frac{Q_{zd}}{Q_z} \chi \left( \frac{Q_{sd}}{Q_{zd}} - 1 \right),$$

$$(7.16b) \quad \varphi_n \frac{Q_{zn}}{Q_z} = \eta_n \psi \frac{Q_{zn}}{Q_z} + (1 - \eta_n \psi) \frac{Q_{zn}}{Q_z} \chi \left( \frac{Q_{sn}}{Q_{zn}} - 1 \right).$$

Po dodaniu stronami równań (7.16 a,b), uwzględnieniu zależności (7.13) i (7.15) przekształconej do postaci

$$\eta \psi = \varphi - (1 - \eta \psi) \chi \left( \frac{Q_s}{Q_z} - 1 \right)$$

oraz wprowadzeniu oznaczenia

$$\bar{\varphi} = \varphi_d \frac{Q_{zd}}{Q_z} + \varphi_n \frac{Q_{zn}}{Q_z},$$

ostatecznie otrzymuje się, że

$$(7.17) \quad \varphi = \bar{\varphi} + (1 - \eta \psi) \chi \left( \frac{Q_s}{Q_z} - 1 \right) - \\ - (1 - \eta_d \psi) \frac{Q_{zd}}{Q_z} \chi \left( \frac{Q_{sd}}{Q_{zd}} - 1 \right) - (1 - \eta_n \psi) \frac{Q_{zn}}{Q_z} \chi \left( \frac{Q_{sn}}{Q_{zn}} - 1 \right).$$

Zestawienie wszystkich postaci szczególnych wyrażenia (7.17) podano w tabelicy 1, w której pola zaciemnione dotyczą przypadków teoretycznych oraz mało prawdopodobnych w warunkach klimatu Polski. W sezonie ogrzewczym, w tych warunkach klimatycznych najczęściej występują przypadki 1.1, 2.1 lub 3.1.1. Natomiast pozostałe z praktycznie możliwych dotyczą z reguły dni na krańcach sezonu ogrzewczego lub w okresach przejściowych.

Przy analizie dobowej efektywności energetycznej systemów biernego ogrzewania słonecznego, a także opracowywaniu wyników badań, wygodnie jest korzystać z bezpośredniej zależności między wskaźnikiem użytecznych zysków ciepła  $\varphi$  a łatwym do wyznaczenia, bezwymiarowym parametrem  $\psi$ . Parametr ten można uzależnić od wprowadzonych

Tablica 1. Zestawienie postaci szczególnych wyrażenia (7.17) w zależności od relacji między ciepłem słonecznym i zapotrzebowaniem na ciepło do ogrzewania w porach dziennej i nocnej oraz w ciągu całej doby

Przyp	Relacje między składowymi		$\frac{Q_{sd}}{Q_{zd}}$	$\frac{Q_{sn}}{Q_{zn}}$	$\frac{Q_s}{Q_z}$	$\chi\left(\frac{Q_{sd}}{Q_{zd}}-1\right)$	$\chi\left(\frac{Q_{sn}}{Q_{zn}}-1\right)$	$\chi\left(\frac{Q_s}{Q_z}-1\right)$	$\varphi$	
1.1.	1.3.1. $Q_{sd} < Q_{zd}$	$Q_{sn} < Q_{zn}$	$Q_s < Q_z$	<1	<1	<1	0	0	0	$\bar{\varphi}$
1.2.		$Q_{sn} = Q_{zn}$	$Q_s < Q_z$	<1	=1	<1	0	0,5	0	$\bar{\varphi}$
1.3.1.		$Q_{sn} > Q_{zn}$	$Q_s < Q_z$	<1	>1	<1	0	1	0	$\bar{\varphi}$
1.3.2.			$Q_s = Q_z$	<1	>1	=1	0	1	0,5	$\bar{\varphi}$
1.3.3.			$Q_s > Q_z$	<1	>1	>1	0	1	1	1
2.1.	2.3. $Q_{sd} = Q_{zd}$	$Q_{sn} < Q_{zn}$	$Q_s < Q_z$	=1	<1	<1	0,5	0	0	$\bar{\varphi}$
2.2.		$Q_{sn} = Q_{zn}$	$Q_s = Q_z$	=1	=1	=1	0,5	0,5	0,5	$\bar{\varphi}$
2.3.		$Q_{sn} > Q_{zn}$	$Q_s > Q_z$	=1	>1	>1	0,5	1	1	1
3.1.1.	3.1.3. $Q_{sd} > Q_{zd}$	$Q_{sn} < Q_{zn}$	$Q_s < Q_z$	>1	<1	<1	1	0	0	$\bar{\varphi}$
3.1.2.			$Q_s = Q_z$	>1	<1	=1	1	0	0,5	$\bar{\varphi}$
3.1.3.			$Q_s > Q_z$	>1	<1	>1	1	0	1	1
3.2.		$Q_{sn} = Q_{zn}$	$Q_s > Q_z$	>1	=1	>1	1	0,5	1	1
3.3.		$Q_{sn} > Q_{zn}$	$Q_s > Q_z$	>1	>1	>1	1	1	1	1

w niniejszej pracy wielkości fizycznych. W tym celu, eliminując wielkość  $H$  ze wzoru (7.11) przez odpowiednie podstawienie przekształconej zależności (7.1), mamy

$$(7.18) \quad \psi = \frac{Q_s^0}{\eta_0 Q_z},$$

a uwzględniając z kolei, zgodnie z (6.6), że

$$(7.19) \quad Q_s^0 = Q_s + \tau \alpha c H \left( \frac{R_{ai}}{R_{ai} + R_{ae}} + \frac{A_a}{R_{ai} + R_{ae}} (t_d \Delta T_{ie}^d + t_n \Delta T_{ie}^n) \right)$$

i podstawiając (7.19) do (7.18), otrzymujemy po przekształceniach algebraicznych

$$(7.20) \quad \psi = \frac{Q_s}{\eta_0 Q_z} + \frac{\tau \alpha H}{\eta_0 Q_z} \frac{R_{ai}}{R_{ai} + R_{ae}} + \frac{A_a}{\eta_0 Q_z (R_{ai} + R_{ae})} (t_d \Delta T_{ie}^d + t_n \Delta T_{ie}^n).$$

Ponieważ, zgodnie z wyrażeniem (7.8)

$$\varphi = \frac{Q_s}{Q_z} + \left(1 - \frac{Q_s}{Q_z}\right) \chi \left(\frac{Q_s}{Q_z} - 1\right),$$

to ostatecznie:

$$(7.21) \quad \psi = \frac{\varphi}{\eta_0} + \frac{A_a}{\eta_0 Q_z (R_{ai} + R_{ae})} \left( \tau \alpha H \frac{R_{ai}}{A_a} + t_d \Delta T_{ie}^d + t_n \Delta T_{ie}^n \right)$$

gdy  $Q_s/Q_z < 1$  oraz

$$(7.22) \quad \psi = \psi_{kr} = \frac{1}{\eta_0} + \frac{A_a}{\eta_0 Q_z (R_{ai} + R_{ae})} \left( \tau \alpha H \frac{R_{ai}}{A_a} + t_d \Delta T_{ie}^d + t_n \Delta T_{ie}^n \right)$$

gdy  $Q_s/Q_z \geq 1$ , przy czym - zgodnie z (7.4)

$$\eta_0 = \tau [\zeta - (\zeta - 1) \alpha \alpha].$$

Wielkość  $\psi_{kr}$  określa krytyczną wartość parametru  $\psi$ , począwszy od której dalszy wzrost tego parametru nie powoduje już proporcjonalnego przyrostu wartości wskaźnika  $\varphi$ . W przypadku systemu zysków bezpośrednich, w którym  $\zeta=1$  oraz  $R_{ae}=\infty$ , mamy

$$(7.23) \quad \psi_{kr}^{ZB} = \frac{1}{\tau},$$

zaś w przypadku systemu zysków pośrednich, w którym  $\zeta=0$  oraz  $\alpha=1$ , mamy

$$(7.24) \quad \psi_{kr}^{ZP} = \frac{1}{\tau \alpha} + \frac{\tau \alpha A_a}{Q_z (R_{ai} + R_{ae})} \left( \tau \alpha H \frac{R_{ai}}{A_a} + t_d \Delta T_{ie}^d + t_n \Delta T_{ie}^n \right).$$

Wyprowadzone zależności (7.12 a,b), (7.13), (7.17), (7.23) i (7.24) pozwalają na analityczne określenie zmiennych  $\eta_d$ ,  $\eta_n$ ,  $\eta$ , dobowego wskaźnika użytecznych zysków ciepła od nasłonecznienia  $\varphi$  oraz krytycznych wartości parametru  $\psi$  osobno dla obu systemów - zysków bezpośrednich ( $\psi_{kr}^{ZB}$ ) lub pośrednich ( $\psi_{kr}^{ZP}$ ). Dzięki temu przedstawione w niniejszym rozdziale rozważania dotyczące mierników efektywności energetycznej systemów biernego ogrzewania słonecznego można uznać za bardziej klarowne, znacznie poszerzone i uogólnione w stosunku do treści podanej na ten temat w opracowaniu [1].



## BIBLIOGRAFIA

1. Laskowski L.: *Systemy biernego ogrzewania słonecznego - zagadnienia funkcjonowania i efektywności energetycznej*. Studia z Zakresu Inżynierii, nr 34. KILiW PAN, Warszawa 1993
2. Kossecka E., Łoskot K., Prętczyński Z.: *Skrócony testowy sezon ogrzewczy*. Prace IPPT, 12/1992
3. Owczarek S.: *Model gęstości energii promieniowania słonecznego na dowolną płaszczyznę*. Prace IPPT, 28/1993
4. Gruber P., Toedtli J.: *On the optimal thermal storage capability of a homogeneous wall under sinusoidal excitations*. Energy and Buildings 13(1989), 3, 177-186
5. Gordon J.M., Zarmi Y.: *Analytic model for passively-heated solar houses*. Solar Energy 27(1981), 4, 331-347
6. Gordon J.M., Zarmi Y.: *Massive storage walls as passive solar heating elements - an analytic model*. Solar Energy 27(1981), 4, 349-355
7. Feuermann D., Gordon J.M., Zarmi Y.: *On massive envelopes in passively-heated solar buildings - an analytic sensitivity study*. Solar Energy 35(1985), 3, 271-280
8. Kossecka E.: *Bilans cieplny prostych systemów heliogrzewczych i przegród budowlanych w długich przedziałach czasu*. Arch. Inż. Łódzkiej 37(1991), 2, 249-264