

P O L S K A A K A D E M I A N A U K

INSTYTUT MASZYN PRZEPLYWOWYCH

PRACE

INSTYTUTU MASZYN
PRZEPLYWOWYCH

TRANSACTIONS

OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

92

WARSZAWA—POZNAŃ 1990

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki maszyn przepływowych

*

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW
MACHINERY

exist for the publication of theoretical and experimental investigations of all aspects of the mechanics and thermodynamics of fluid-flow with special reference to fluid-flow machinery

RADA REDAKCYJNA—EDITORIAL BOARD

TADEUSZ GERLACH · HENRYK JARZYNA · JERZY KRZYŻANOWSKI
STEFAN PERZYCH · WŁODZIMIERZ PROSNAK · KAZIMIERZ STELLER
ROBERT SZEWAŁSKI (PRZEWODNICZĄCY—CHAIRMAN) · JÓZEF ŚMIGIELSKI

KOMITET REDAKCYJNY—EXECUTIVE EDITORS

KAZIMIERZ STELLER — REDAKTOR — EDITOR
WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ · ZENON ZAKRZEWSKI
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA—EDITORIAL OFFICE

Instytut Maszyn Przepływowych PAN
ul. Gen. Józefa Fiszer 14, 80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, tel. 41-12-71

Copyright
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1990

Printed in Poland

ISBN 83-01-10189-X
ISSN 0079-3205

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE — ODDZIAŁ W POZNANIU

Ark. wyd. 17,75. Ark. druk. 13. Papier druk. sat. kl. III, 70 g, 70×100 cm
Oddano do składania w lipcu 1989 r. Podpisano do druku w listopadzie 1990 r.
Druk ukończono w grudniu 1990 r. Zam. nr 1079/89

Zakłady Graficzne im. KEN w Bydgoszczy

BRUNON GROCHAL

Gdańsk

Analiza rozkładów temperatury w kolektorach energii słonecznej bez wypełnienia i z wypełnieniem*

W pracy podano zależności opisujące rozkład temperatury w zwykłym kolektorze energii słonecznej i w kolektorze nowego typu z wypełnieniem, w którym padające promieniowanie jest pochłaniane według prawa wykładniczego. Porównanie tych kolektorów na podstawie wyników obliczeń opartych na przyjętym modelu pochłaniania wskazuje na wyraźną wyższość kolektora nowego typu (z wypełnieniem).

Wykaz oznaczeń

h — współczynnik przejmowania ciepła,	L — absorbera, współrzędnej $x = L$,
I — gęstość strumienia energii,	N — gęstości strumienia energii „netto” (bez strumienia odbitego od pokrycia),
k — współczynnik pochłaniania promieniowania,	0 — pokrycia, współrzędnej $x = 0$,
L — odległość pokrycie—absorber, grubość złoza,	P — płyty pokrycia,
$\dot{Q}$ — gęstość strumienia energii odbieranej z kolektora przez ogrzany czynnik,	q — ogrzewanego czynnika,
T — temperatura,	R — promieniowania odbitego,
x — współrzędna,	S — energii przekazywanej otoczeniu,
ε — współczynnik emisyjności,	$+$ — kierunku wzrostu x ,
σ — stała promieniowania,	$-$ — kierunku przeciwnego do kierunku wzrostu x ,
λ_z — zastępczy współczynnik przewodnictwa cieplnego złoza,	$*$ — stanu równowagi energetycznej kolektora z otoczeniem bez odbioru ciepła przez ogrzewany czynnik,
	Σ — wartości sumarycznej (całkowitej).

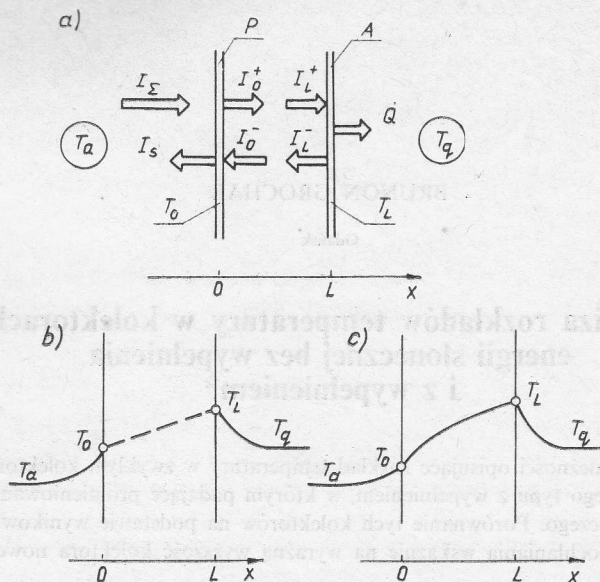
Indeksy dotyczą:

- a — otoczenia,
 C — konwekcji między absorberem i pokryciem w zwykłym kolektorze,

1. Wstęp

Rozważmy prosty, płaski kolektor energii promieniowania, składający się z absorbera A i oddalonego od niego o L pokrycia P (rys. 1a). Z całego promieniowania I padającego na pokrycie część przechodzi przez nie, z tego I_L^+ dociera do

* Praca wykonana w ramach Programu Rządowego PR-8: „Kompleksowy rozwój energetyki”, zadanie 6.1.1.03.



Rys. 1. Schemat płaskiego kolektora do wywodu zależności; a) strumienie energii, b) szkic rozkładu temperatur w kolektorze bez wypełnienia, c) szkic rozkładu temperatur w kolektorze z wypełnieniem

P — pokrycie, A — absorber

absorbera. Przy braku pochłaniania w przestrzeni między pokryciem i absorberem jest $I_0^+ = I_L^+$. Z padającego na absorber strumienia energii I_L^+ część Q jest przekazywana podgrzewanemu czynnikowi, a reszta, to jest I_L^- , odsyłana jest w kierunku pokrycia, do którego dociera część I_0^- . Przy braku pochłaniania w przestrzeni między pokryciem i absorberem jest $I_L^- = I_0^-$. Do otoczenia przekazywany jest strumień energii I_s .

Opisany proces zachodzi przy ustalonym rozkładzie temperatury naszkicowanym na rysunku 1b. Ogólnie mówiąc, rozkład ten zależy od temperatury otoczenia T_a i podgrzewanego czynnika T_q , własności materiałowych kolektora, oraz natężenia strumienia padającego I . Sposób obliczania temperatur dla takiego prostego kolektora podany został w [1].

Za miarę efektywności kolektora można uznać temperaturę pokrycia decydującą o wielkości strat do otoczenia o niższej temperaturze. Z obu kolektorów pracujących przy tej samej wartości strumienia energii wchodzącej do kolektora (I_{Σ}) pomniejszonego o energię odbitą od pokrycia, kolektor o niższej temperaturze pokrycia będzie efektywniejszy.

Jednym z możliwych sposobów podniesienia efektywności kolektora jest zastosowanie większej liczby pokryć. Rozwiązanie to ma pewne wady powodujące, że w praktyce najczęściej stosuje się jedno pokrycie. Dalej, można sobie wyobrazić pokrycie stykające się z absorberem (tzn. byłoby $L = 0$ na rys. 1), wówczas jednak traci się izolujące działanie warstwy powietrza i efektywność takiego kolektora jest niższa niż kolektora z warstwą powietrza. Można wreszcie zastosować wypełnienie przestrzeni między pokryciem i absorberem [4]. Wypełnienie to powinno charakte-

ryzować się dobrą przepuszczalnością promieniowania krótkofalowego, które ma docierać do absorbera, oraz możliwie złą przepuszczalnością promieniowania ciepłego i złą przewodnością cieplną. Wymienione cechy ma wypełnienie w postaci złoża elementów z materiału półprzezroczystego, np. szklane kulki lub po prostu tłuczone szkło. Obecność złoża uniemożliwia konwekcyjne przenoszenie ciepła przez powietrze od absorbera do pokrycia oraz utrudnia przekazywanie ciepła na drodze promieniowania, działając podobnie jak duża liczba pokryć. Dzięki, w zasadzie, punktowym stykom elementów złoża ze sobą bardzo utrudnione jest także przewodzenie ciepła i złoże ma co najmniej kilkakrotnie mniejszy efektywny współczynnik przewodnictwa ciepłego niż materiał elementów (np. [2], s. 418).

Plaski kolektor słoneczny nowego typu, w którym przestrzeń między pokryciem i absorberem wypełniona jest opisanym wyżej złożem, powinien dzięki obecności wypełnienia osiągnąć wyższą efektywność niż zwykły kolektor bez wypełnienia. Rozkład temperatury w kolektorze nowego typu można więc naszkicować jak na rysunku 1c. Obliczenia rozkładu temperatur dla kolektora nowego typu oraz porównanie nowego kolektora ze zwykłym kolektorem bez wypełnienia są przedmiotem tej pracy.

Ze względu na przejrzystość wywodów oraz wstępny charakter pracy posłużono się prostymi modelami przenoszenia energii w złożu, przyjmując wykładniczy model osłabiania gęstości strumienia energii dla promieniowania krótkofalowego, przechodzącego przez złoże do absorbera

$$I = I|_{x=0} e^{-kx}, \quad (1)$$

dla całego zakresu długości fal (w zakresie krótkofalowym).

Dla przepływu energii od absorbera przez złoże do otoczenia przyjęto model przewodnictwa ciepłego, wprowadzając zastępczy współczynnik przewodnictwa ciepłego dla złoża (por. [2], s. 418). Opis oparty na użyciu bardziej złożonego modelu transportu energii od absorbera przez złoże do otoczenia, uwzględniający dla promieniowania ciepłego model Rosselanda, przedstawiono w [3].

2. Rozkład temperatur w kolektorach

Uwzględniając wprowadzone na rysunku 1 oznaczenia można napisać następujące równania bilansowe:

— dla absorbera

$$I_L^+ = I_L^- + \dot{Q}, \quad (2)$$

— dla płyty pokrycia

$$I_\Sigma + I_0^- = I_0^+ + I_S, \quad (3)$$

— dla całego kolektora

$$I_\Sigma = I_S + Q. \quad (4)$$

Wprowadźmy teraz następujące wielkości, określające bliżej składniki strumieni energii:

— gęstość strumienia energii promieniowania odbitego od zewnętrznej powierzchni pokrycia I_R ,

— gęstość strumienia energii pochłanianej przez płytę pokrycia I_P ,

— gęstość strumienia energii przekazywanej od płyty pokrycia do otoczenia na drodze promieniowania

$$I_{Pe} = \varepsilon_P \sigma (T_0^4 - T_a^4), \quad (5)$$

— gęstość strumienia energii przekazywanej od płyty pokrycia do otoczenia na drodze konwekcji

$$I_{PC} = h_a (T_0 - T_a). \quad (6)$$

Za pomocą wprowadzonych wielkości możemy wyrazić I_Σ i I_S jak następuje:

$$I_\Sigma = I_R + I_P + I_0^+, \quad (7)$$

$$I_S = I_R + I_P + I_0^-, \quad (8)$$

stąd

$$I_\Sigma - I_R = I_P + I_0^+, \quad (9)$$

$$I_S - I_R = I_P + I_0^-. \quad (10)$$

Prawe strony (9) i (10) przedstawiają te składniki strumieni energii, które faktycznie „podlegają obróbce” w kolektorze, wymuszając określony rozkład temperatury. Oznaczmy je dla skrócenia zapisu

$$I_N^+ = I_P + I_0^+, \quad (11)$$

$$I_N^- = I_P + I_0^-. \quad (12)$$

Korzystając z (7) i (8), z uwzględnieniem (11) i (12), zapiszemy (3) w postaci

$$I_N^+ - I_N^- = (I_P + I_0^+) - (I_P + I_0^-) \quad (13)$$

oraz (4) w postaci

$$I_N^+ - I_N^- = \dot{Q}. \quad (14)$$

Porównanie (13) i (14) prowadzi do związku

$$I_P + I_0^+ = (I_P + I_0^-) + \dot{Q}. \quad (15)$$

Składniki prawej strony (15) możemy wyrazić przez temperatury następująco:

— przyjmując, że energia od płyty pokrycia do otoczenia przekazywana jest na drodze promieniowania cieplnego i konwekcji zapiszemy

$$(I_N^- = I_P + I_0^-) = \varepsilon_P \sigma (T_0^4 - T_a^4) + h_a (T_0 - T_a), \quad (16)$$

— przyjmując, że energia od absorbera do ogrzewanego czynnika przekazywana jest na drodze konwekcji zapiszemy

$$\dot{Q} = h_q (T_L - T_q). \quad (17)$$

Podstawiając (16) i (17) w (15) otrzymuje się pierwsze równanie

$$I_p + I_0^+ = \varepsilon_p \sigma (T_0^4 - T_a^4) + h_a (T_0 - T_a) + h_q (T_L - T_q), \quad (18)$$

określające zależność rozkładu temperatur w kolektorze od strumieni dopływającej i pobieranej energii, z uwzględnieniem wpływu otoczenia. W równaniu tym niewiadomymi są temperatury T_0 i T_L , reszta wielkości jest traktowana jako wielkości znane.

Drugim równaniem określającym rozkład temperatur w kolektorze jest równanie (2). Jego postać po wprowadzeniu temperatur zależy jednak od typu kolektora, a ściślej, od sposobu przekazywania energii od absorbera do płyty pokrycia. Równania dla omawianych kolektorów podane są poniżej.

2.1. Kolektor bez wypełnienia

Pomijając pochłanianie warstwy powietrza można przyjąć

$$I_0^+ = I_L^+, \quad (19)$$

$$I_0^- = I_L^-. \quad (20)$$

Przyjmując następnie, że absorber pochłania całkowicie padającą nań energię i przekazuje płycie pokrycia energię na drodze promieniowania cieplnego i konwekcji, mamy

$$(I_0^- = I_L^-) = \varepsilon_a \sigma (T_L^4 - T_0^4) + h_c (T_L - T_0), \quad (21)$$

wobec czego z (2), z uwzględnieniem (17), jest

$$I_0^+ = \varepsilon_0 \sigma (T_L^4 - T_0^4) + h_c (T_L - T_0) + h_q (T_L - T_q). \quad (22)$$

Jest to równanie, które wraz z (18) tworzy układ równań pozwalający wyznaczyć temperatury T_0 i T_L dla kolektora bez wypełnienia.

2.2. Kolektor z wypełnieniem

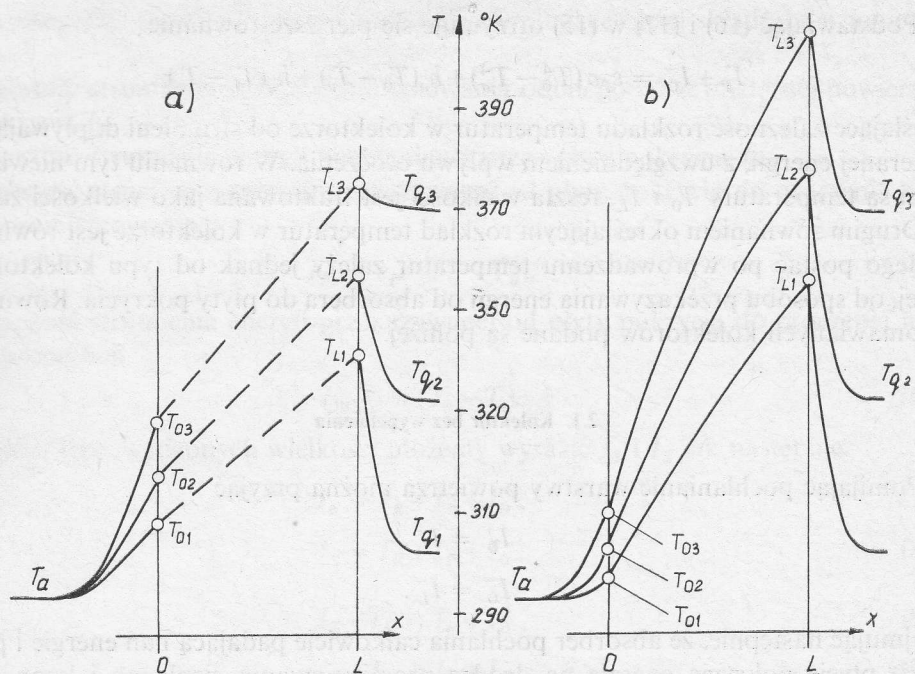
Przyjmując, jak wspomniano we wstępie, że przekazywanie energii w złożu następuje na drodze przewodzenia, można napisać następujące równanie wymiany ciepła w złożu

$$-\lambda_z \frac{d^2 T}{dx^2} = -\frac{dI}{dx}. \quad (23)$$

Prawa strona (23) ujemnie energię promieniowania krótkofalowego pochłanianego przez złożę, przetwarzaną na energię cieplną i występującą w równaniu jako źródło ciepła.

Ponieważ dla $x = 0$ jest $I = I_0^+$ (rys. 1), więc z (1) jest

$$\frac{dI}{dx} = -I_0^+ k e^{-kx} \quad (24)$$



Rys. 2. Rozkłady temperatur w kolektorach: a) zwykłym, b) z wypełnieniem

	T_{0i} [K]		T_{Li} [K]		η	
	a	b	a	b	a	b
$T_{q1} = 303 \text{ K}$	308,0	297,5	341,1	356,1	0,3387	0,472
$T_{q2} = 333 \text{ K}$	317,4	303,2	356,9	378,0	0,2124	0,400
$T_{q3} = 370 \text{ K}$	329,0	310,1	375,4	405,0	0,0480	0,311

$$T_a = 293 \text{ K}, I_0^+ = 700 \text{ W/m}^2, I_p = 200 \text{ W/m}^2, h_a = 5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}, h_u = 8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}, h_c = 4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K},$$

$$L = 0,04 \text{ m}, \lambda_z = 0,16 \text{ W/m} \cdot \text{K}, k = 3 \text{ m}^{-1}, \eta = \frac{h_q(T_{Li} - T_{qi})}{(I_p + I_0^+)}$$

i (23) przechodzi w

$$-\lambda_z \frac{d^2 T}{dx^2} = I_0^+ k e^{-kx} \quad (25)$$

Warunki brzegowe są następujące:

$$x = 0 (T = T_0) \quad \lambda_z \left(\frac{dT}{dx} \right)_0 = I_0^-, \quad (26a)$$

$$x = L (T = T_L) \quad \lambda_z \left(\frac{dT}{dx} \right)_L = I_L^-. \quad (26b)$$

Z (1) jest dla $x = L$

$$I_L^+ = I_0^+ e^{-kL}. \quad (27)$$

Podstawiając (26b), (27) i (17) do (2) mamy

$$I_0^+ e^{-kL} = \lambda_z \left(\frac{dT}{dx} \right)_L + h_q (T_L - T_q). \quad (28)$$

Formalne całkowanie (25) w granicach grubości złoży $x \in [0, L]$ prowadzi do równania

$$-\lambda_z \left(\frac{dT}{dx} \right)_L - \left[-\lambda_z \left(\frac{dT}{dx} \right)_0 \right] = I_0^+ (1 - e^{-kL}), \quad (29)$$

z którego wobec (28) wynika

$$\lambda_z \left(\frac{dT}{dx} \right)_0 = I_0^+ - h_q (T_L - T_q), \quad (30a)$$

lub w innej formie

$$\lambda_z \left(\frac{dT}{dx} \right)_0 = I_0^+ - Q. \quad (30b)$$

Całkując teraz dwukrotnie (25) mamy kolejno:

$$-\lambda_z \left(\frac{dT}{dx} \right) = -I_0^+ e^{-kx} + C_1, \quad (31)$$

$$-\lambda_z T = \frac{I_0^+}{k} e^{-kx} + C_1 x + C_2. \quad (32)$$

Dla wyznaczenia C_1 posłużymy się wzorami (30b) i (31) przyjmując w (31) $x = 0$, skąd

$$C_1 = Q = h_q (T_L - T_q). \quad (33)$$

Podstawiając z kolei $x = 0$ w (32) i biorąc pod uwagę, że $T = T_0$, wyznaczamy z (32) C_2

$$C_2 = -\frac{I_0^+}{k} - \lambda_z T_0. \quad (34)$$

Tak więc ostatecznie mamy z (32), z uwzględnieniem (33) i (34),

$$T = T_0 + \frac{I_0^+}{k\lambda_z} (1 - e^{-kx}) - (T_L - T_q) \frac{h_q x}{\lambda_z}. \quad (35)$$

Dla $x = L$ w (35) po lewej stronie jest $T = T_L$, czyli

$$T_L = T_0 + \frac{I_0^+}{k\lambda_z} (1 - e^{-kL}) - (T_L - T_q) \frac{h_q L}{\lambda_z}. \quad (36)$$

Jest to równanie, które wraz z (18) tworzy układ równań pozwalający wyznaczyć temperatury T_0 i T_L dla kolektora z wypełnieniem.

3. Obliczenia

Wyprowadzone powyżej układy równań:

— dla kolektora zwykłego (bez wypełnienia)

$$I_p + I_0^+ = \varepsilon_p \sigma (T_0^4 - T_a^4) + h_a (T_0 - T_a) + h_q (T_L - T_q), \quad (18)$$

$$I_0^+ = \varepsilon_0 \sigma (T_L^4 - T_0^4) + h_c (T_L - T_0) + h_q (T_L - T_q), \quad (22)$$

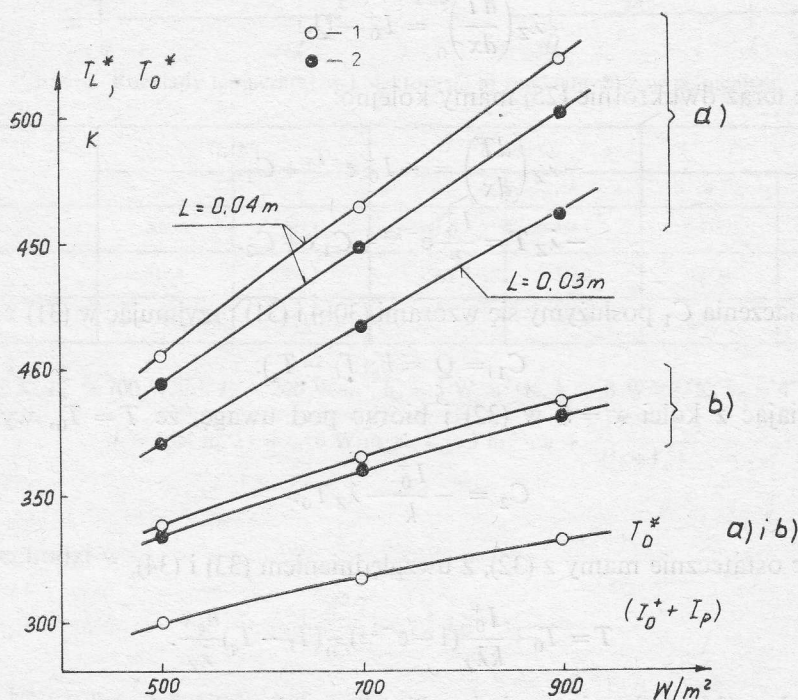
— dla kolektora nowego typu (z wypełnieniem)

$$I_p + I_0^+ = \varepsilon_p \sigma (T_0^4 - T_a^4) + h_a (T_0 - T_a) + h_q (T_L - T_q), \quad (18)$$

$$T_L = T_0 + \frac{I_0^+}{k \lambda_Z} (1 - e^{-kL}) - (T_L - T_q) \frac{h_q L}{\lambda_Z}, \quad (36)$$

rozwiązano numerycznie. Dla obydwu kolektorów przyjęto do obliczeń te same wartości parametrów I_p , h_a , h_q , h_c , T_a , T_q oraz założono dla uproszczenia $\varepsilon_p = \varepsilon_a = 1$.

Z podanych wyżej układów równań można także wyznaczyć maksymalną temperaturę absorbera $T_L = T^*$ wynikającą z warunku $Q = 0$, jak również odpowiadającą



Rys. 3. Maksymalna temperatura absorbera T_L^* i pokrycia T_0^* ;

a) nowy typ kolektora, b) zwykły kolektor

$$h_a = 5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}, h_c = 4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}, \lambda_Z = 0,16 \text{ W/m} \cdot \text{K}, k = 3 \text{ m}^{-1}$$

$$\text{Punkty oznaczają: } 1 - \frac{I_p}{I_0^+ + I_p} = 0,1 \quad 2 - \frac{I_p}{I_0^+ + I_p} = 0,2$$

jącej jej temperaturę pokrycia T_0^* . Temperatura T_L^* określa naturalnie także teoretycznie możliwe podgrzanie ogrzewanego czynnika. Przykładowe wyniki odpowiednich obliczeń przedstawiono na rysunku 3.

4. Podsumowanie

Przedstawione w pracy obliczenia, których przykładowe wyniki pokazano na rysunkach 2 i 3, prowadzą do następujących wniosków:

1. Zastosowanie półprzezroczystego złoza (z odpowiednio dobranego materiału) między pokryciem i absorberem kolektora energii słonecznej może doprowadzić do uzyskania lepszej efektywności kolektora, wyrażającej się niższą temperaturą pokrycia w porównaniu ze zwykłym kolektorem (bez wypełnienia).

2. Zastosowanie złoza umożliwia osiągnięcia wysokich temperatur podgrzewanego czynnika na wylocie z kolektora.

3. Rezultaty obliczeń opartych na wykładniczym prawie pochłaniania (1) są zachęcające. Odpowiednie eksperymenty poprzedzone jednak muszą być wyszukaniem właściwego materiału na złoże, który umożliwiłby uzyskanie wymienionych wyżej efektów bez nadmiernego wzrostu ciężaru kolektora na skutek konieczności stosowania grubej warstwy złoza.

Praca wpłynęła do Redakcji w grudniu 1985 r.

Literatura

- [1] J. Mikieliewicz, S. Gumkowski, *Uproszczony algorytm do obliczania płaskich kolektorów słonecznych*. Oprac. wewn. IMP PAN Gdańsk, nr arch. 153/82.
- [2] J. Madejski, *Teoria wymiany ciepła*. PWN, Warszawa-Poznań 1963.
- [3] B. Grochal, *Rozkład temperatury w kolektorze z optycznie czynnym wypełnieniem*. Arch. Termodynamiki, vol. 8(1987), nr 3.
- [4] B. Grochal, J. Mikieliewicz, *Model kolektora słonecznego z pochłanianiem energii w objętości*. Zesz. Nauk. Pol. Śl. Gliwice, Energetyka, z. 90, 1985.

Анализ распределений температуры в коллекторах солнечной энергии без заполнения и с заполнением

Резюме

Из балансов энергии абсорбера (2), покрытия (3) и целого коллектора выведены зависимости описывающие распределение температур: в обычном коллекторе (18) и (23) и в коллекторе нового типа, в котором пространство между покрытием и абсорбером заполнено зернистым слоем прозрачного материала с коэффициентом поглощения k и эффективной теплопроводностью λ_z , (18) и (36). Примерные результаты вычислений распределения температур приведены на рис. 2, на рис. 3 показаны температуры абсорбера T_L^* и покрытия T_0^* , которые могут быть достигнуты без отвода тепла Q из коллектора. Из вычислений вытекает, что коллектор нового типа может оказаться гораздо лучшим по сравнению с обычным.

The Analysis of Temperature Distributions in Solar Energy Collectors with and without Filling

Summary

From the energy balance for the absorber (2), cover plate (3) and entire collector (4), Fig. 1, two sets of equations describing the local temperature distribution in the collector have been derived: (18) and (23) for an ordinary collector and (18) and (36) for a collector of new type in which the space between the cover and the absorber is filled with a semi-transparent packed bed characterized by the absorption coefficient k and the effective thermal conductivity λ_z . The examples of calculated temperature distributions are presented in Fig. 2a for the ordinary collector and in Fig. 2b for the one of new type. Fig. 3 shows the temperatures of absorber T_a^* and cover plate T_o^* which can be reached without heat extraction from the collector ($Q = 0$), i.e. the maximum temperatures attainable. The results of calculation based on assumption (1) indicate that the solar collector of new type offers the possibility of reaching much higher effectiveness and higher temperature of heated fluid than the ordinary one.