

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 PERYCZ · 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

ZBIGNIEW ZAPĄŁOWICZ

Szczecin

Badania fotograficzne i oszacowanie czasu odparowania kropli wody z powierzchni płaskiej ścianki

W pracy przedstawiono stanowisko badawcze oraz wyniki badań fotograficznych procesu odparowania pojedynczej kropli wody z powierzchni płaskiej ścianki do atmosfery wilgotnego powietrza. Analiza otrzymanych fotografii pozwoliła stwierdzić, że proces odparowania kropli przebiega etapami. W każdym etapie odparowania kropli zachowana jest stała powierzchnia zetknięcia cieczy ze ścianką. Zmianie ulega jedynie wysokość kropli. Przejście od jednego etapu odparowania do drugiego następuje gwałtownie, w momencie utraty stabilności na granicy faz gaz—ciecz—ciało stałe. Zaobserwowany przebieg procesu odparowania kropli pozwolił na sformułowanie modelu fizycznego tego zjawiska i modyfikację metody obliczania czasu jej odparowania przedstawionej w pracy [4].

Wykaz oznaczeń

q — ciepło parowania [J/kg],	λ — współczynnik przewodzenia ciepła [W/(m · K)],
$\dot{m}$ — strumień masowy pary [kg/s],	q — promień kropli przed zetknięciem z powierzchnią [m].
R — promień podstawy czaszy kulistej [m],	
t — czas [s],	
T — temperatura [K],	
α — objętość właściwa [m ³ /kg],	
V — objętość kropli [m ³],	
α — kąt bieżący,	
θ — kąt zwilżania,	
ε — współczynnik charakteryzujący rozkład temperatury na powierzchni ścianki,	
	Indeksy
	k — wartość końcowa,
	l — ciecz,
	0 — wartość początkowa,
	s — nasycenie,
	v — para,
	w_0 — wolna powierzchnia ścianki.

1. Wstęp

We wcześniejszych pracach autora [3, 4], przedstawiono nową koncepcję podgrzewu wewnętrznego w turbinie. Zastosowanie tej koncepcji wymaga aby para grzejna, płynąca i skraplająca się wewnątrz łopatek kierowniczych, posiadała parametry cieplne pozwalające na utrzymanie dostatecznie wysokiej temperatury zewnętrznej powierzchni tych łopatek. Wówczas krople wody separujące się na powierzchni łopatek z płynącej kanałem międzyłopatkowym pary mokrej odparowywałyby tak szybko, że nie zdołałyby utworzyć — wspólnie z innymi padającymi kroplami —

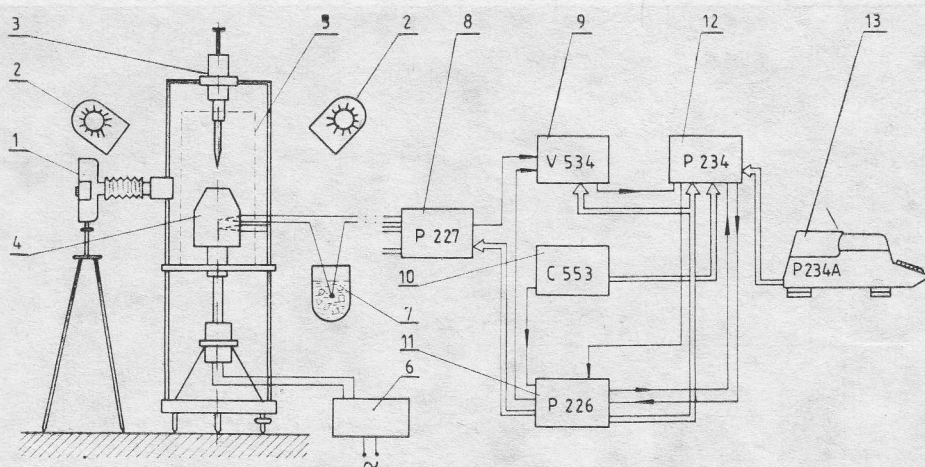
ciągłego filmu wodnego na powierzchni. Istnieje więc konieczność wcześniejszego oszacowania czasu (szybkości) odparowania kropli z powierzchni łopatk.

W pracy [4] podano model fizyczny zjawiska odparowania kropli z powierzchni płaskiej i opartą na nim metodę obliczania czasu odparowania. Przyjęto, że kropla, która trafi na powierzchnię łopaty tworzy w sposób natychmiastowy czasę kulistą o kącie zwilżania θ . Począwszy od tej chwili odparowanie cieczy występuje tylko na wolnej powierzchni kropli (tj. na powierzchni rozdziału faz ciecz—para) kosztem ciepła przewodzonego przez nią od ścianki. Zaproponowana w pracy [4] metoda obliczania czasu odparowania kropli zakłada, że kąt zwilżania θ pozostaje w czasie procesu odparowania niezmienny. Obliczony tą metodą czas odparowania kropli jest dłuższy od rzeczywistego czasu „znikania” kropli z powierzchni łopaty kierowniczej turbiny. Warunki rzeczywiste panujące w turbinie oraz wystąpienie ruchów konwekcyjnych wewnątrz kropli sprzyjają intensyfikacji wymiany ciepła i masy, prowadząc do skrócenia tego czasu. Czas wyznaczony z modelu quasi-statycznego można potraktować jako bezpieczną, górną granicę czasu odparowania kropli.

Pełna weryfikacja doświadczalna założeń tak przedstawionego modelu zjawiska wymaga użycia metod umożliwiających rejestrację przebiegu odparowania w czasie (np. filmowania), co zostało przewidziane w następnym etapie pracy. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań fotograficznych odparowania kropli. Analiza tych wyników umożliwia ocenę poszczególnych etapów zjawiska w ujęciu quasi-statycznym, a także pozwala na wyciągnięcie wniosków dotyczących przebiegu procesu. Na tej podstawie omówiono nowy model fizyczny przebiegu zjawiska odparowania oraz przeprowadzono dyskusję założeń skorygowanej metody obliczania czasu odparowania. Czas odparowania kropli uzyskany skorygowaną metodą obliczeniową porównano z wynikami podanymi w pracy [4], co pozwoliło na ocenę trafności przyjętych założeń.

2. Opis stanowiska badawczego

Celem przeprowadzenia badań zbudowano stanowisko badawcze, umożliwiające wizualną rejestrację procesu odparowania oraz dokonywanie zdjęć. Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 1. W skład stanowiska badawczego wchodzi: grzejnik, system mierzący i rejestrujący temperaturę, zakraplacz oraz aparat fotograficzny z układem oświetleniowym. Przy konstrukcji grzejnika kierowano się sugestiami zawartymi w pracach [1, 2]. Element grzejny stanowi lutownica elektryczna o mocy 150 W. W grzejniku, na bocznej powierzchni cylindrycznej, wywiercono 8 otworów o średnicy 2 mm i głębokości równej promieniowi części cylindrycznej. Odległości między środkami otworów a powierzchnią roboczą zmierzono za pomocą optimetru. Następnie w otworach tych osadzono, zalewając gorącą cyną, termopary miedź—konstantan (Cu—Konst.) wykonane z drutów o średnicy 0,4 mm. Boczne powierzchnie grzejnika zaizolowano sznurem azbestowym. Górną powierzchnię grzejnika, będącą powierzchnią roboczą, pokryto cienką warstwą niklu (o grubości około 20 μm). Powierzchnię tę poddano szlifowaniu i dogładzono pastą polerską osiągając „lustrzaną” gładkość. Grzejnik połączo-



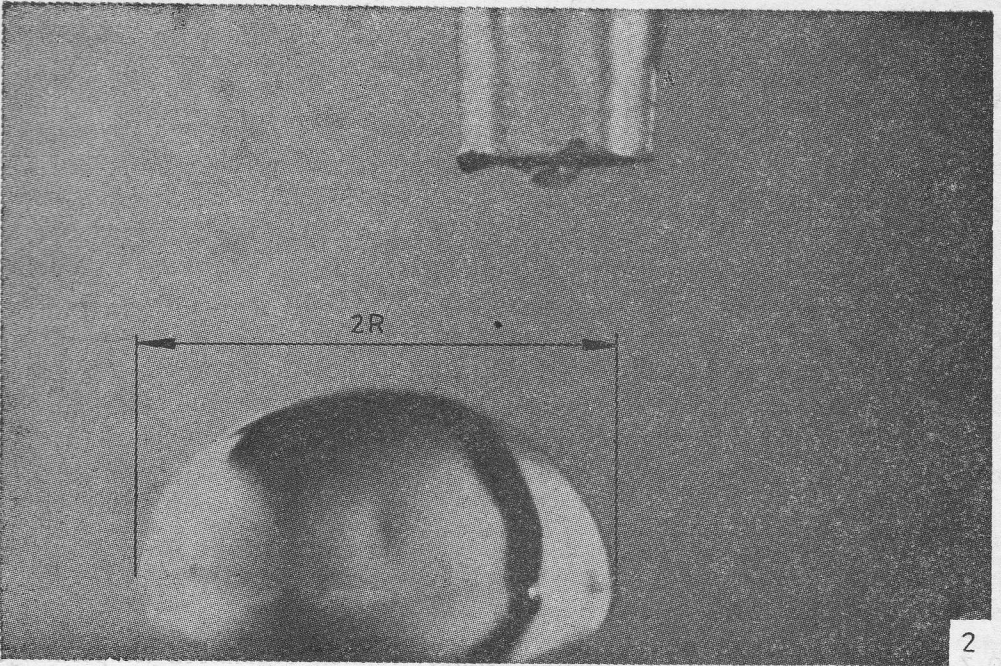
Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego

1 — aparat fotograficzny, 2 — lampa halogenowa, 3 — mikropipeta, 4 — grzejnik, 5 — klosz, 6 — autotransformator, 7 — naczynie z lodem, 8 — przełącznik kanałów (typ P 227), 9 — woltomierz cyfrowy (typ V 534), 10 — zegar cyfrowy (typ C 553), 11 — blok sterujący przełącznikiem kanałów (typ P 226), 12 — blok sterujący rejestratora (typ P 234), 13 — rejestrator (typ P 234A)

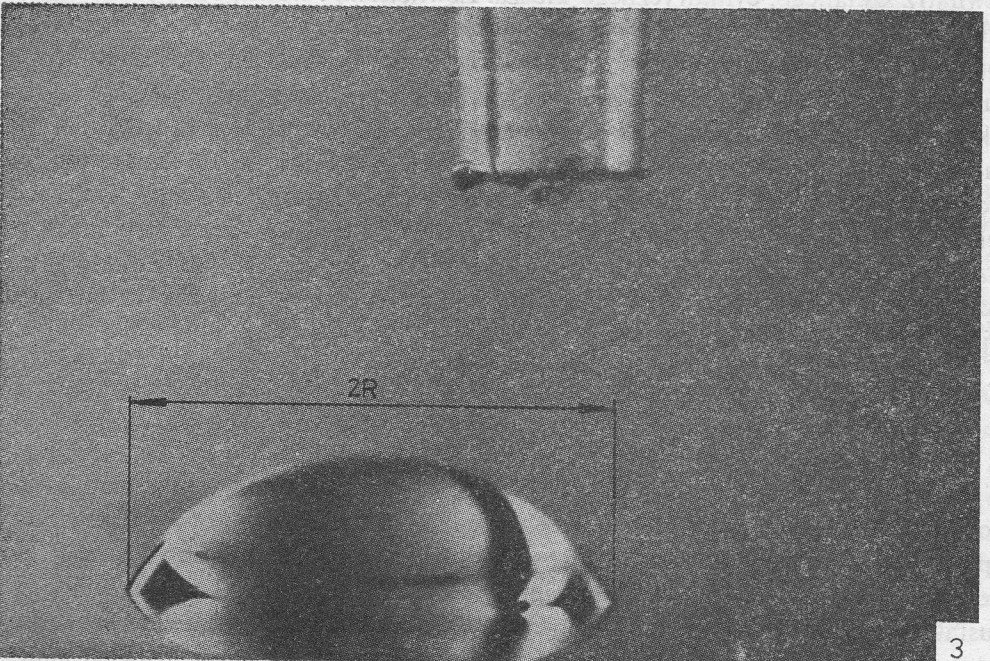
no z siecią poprzez autotransformator pełniący funkcję regulatora temperatury. Wychodzące z grzejnika termopary podłączono do systemu pomiarowo-rejestrującego. W skład tego systemu wchodzi: zegar cyfrowy (typ C 553), przełącznik kanałów (typ P 227), blok sterujący przełącznikiem kanałów (typ P 226), rejestrator wierszowo-kolumnowy (typ P 234) oraz woltomierz cyfrowy (typ V 534). Grzejnik umieszczono wewnątrz szklanego, cylindrycznego klosza. Zewnętrzną i wewnętrzną powierzchnię klosza zmatowiono w celu rozproszenia światła. W połowie wysokości klosza wykonano otwór o średnicy 20 mm, poprzez który fotografowano odparującą kroplę. Tuż nad powierzchnią roboczą grzejnika zawieszono mikropipetę spełniającą rolę zakraplacza. Grzejnik, klosz i mikropipetę zamocowano we wspólnym stojaku. Zdjęcia wykonywano aparatem fotograficznym typu Zenit S, przystosowanym do makrofotografii (z użyciem pierścieni pośrednich i mieszka fotograficznego). Do oświetlenia użyto dwóch lamp halogenowych o mocy 1000 W każda, ustawionych po przeciwnych stronach grzejnika, w odległości 50 cm od jego środka. Zmiany parametrów otoczenia odczytywano z barometru aneroidowego, termometru laboratoryjnego oraz psychrometru Assmanna.

3. Metodyka i zakres badań

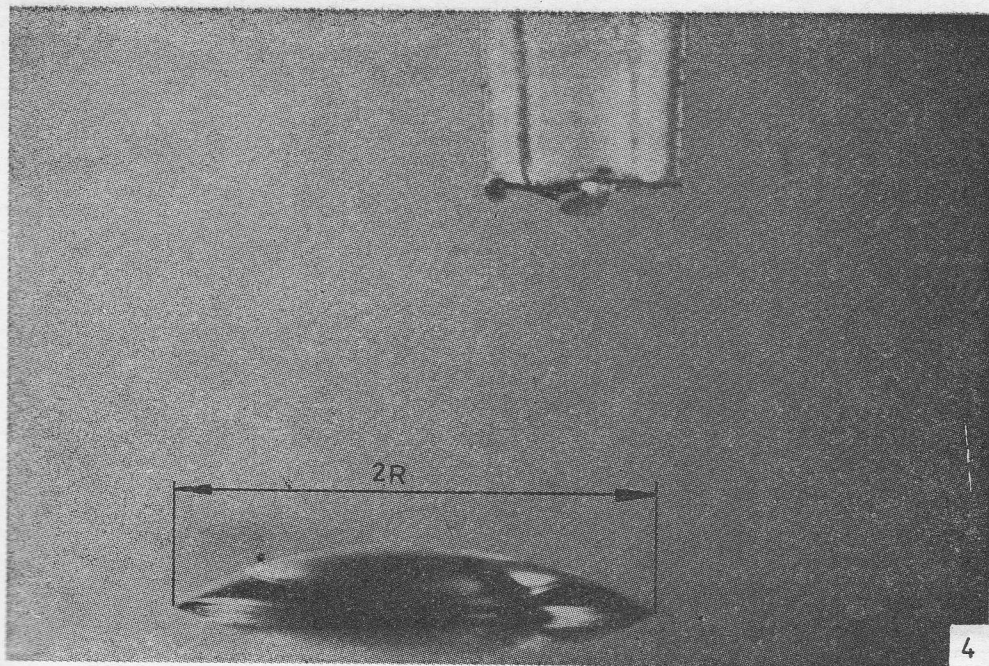
Na przedstawionym stanowisku badawczym fotografowano pojedyncze krople wody odparującej z powierzchni płaskiej do atmosfery wilgotnego powietrza. Aparat fotograficzny ustawiono tak, by oś optyczna aparatu znajdowała się w płaszczyźnie roboczej („lustrzanej”) grzejnika. Temperatura grzejnika była zmieniana i ustalana za pomocą autotransformatora. Wartości siły elektromotorycznej termopar mierzone wzdłuż części cylindrycznej grzejnika pozwalały ocenić rozkład tempe-



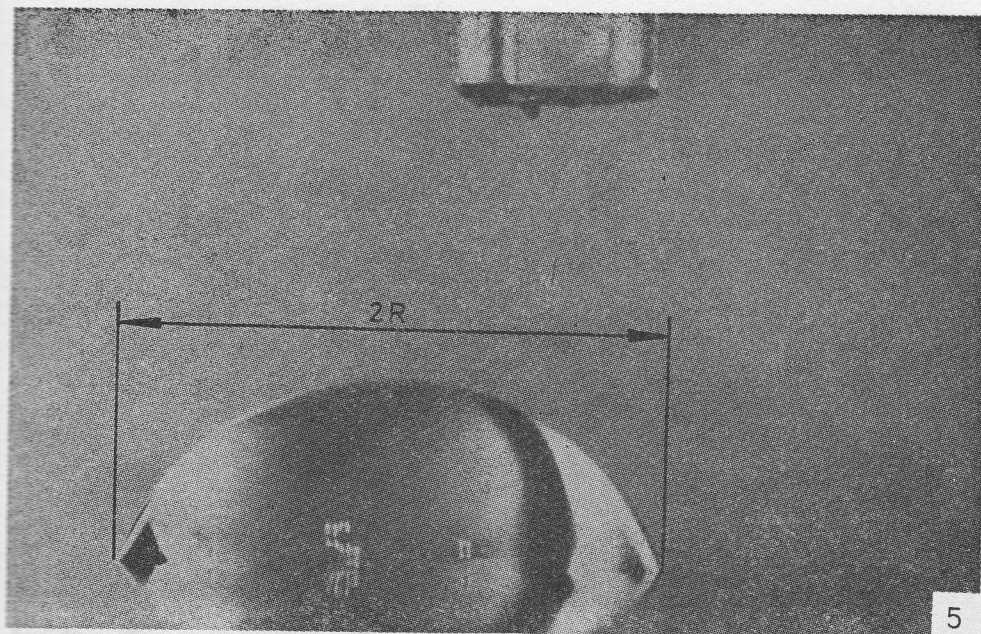
2



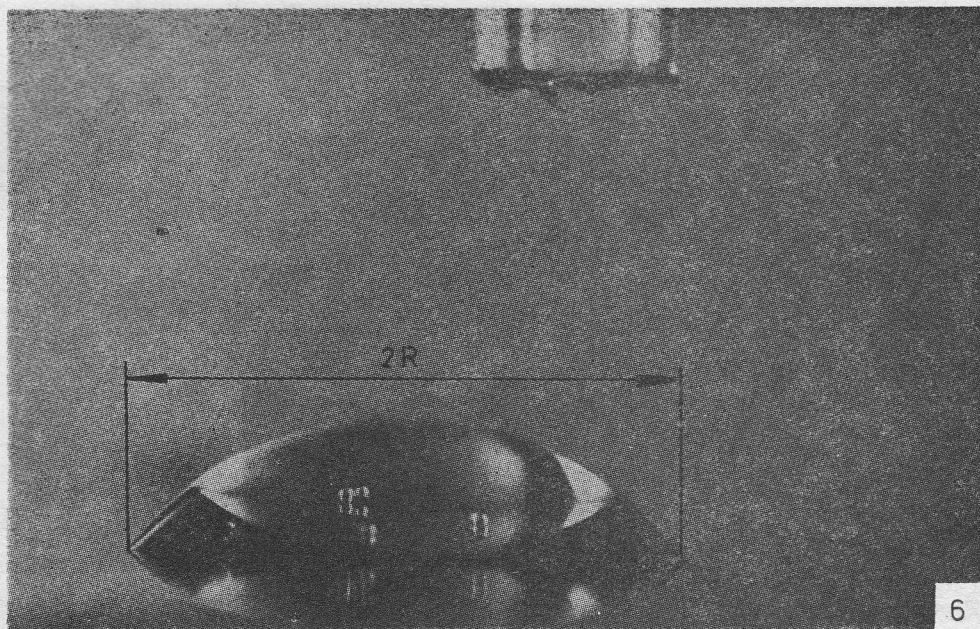
3



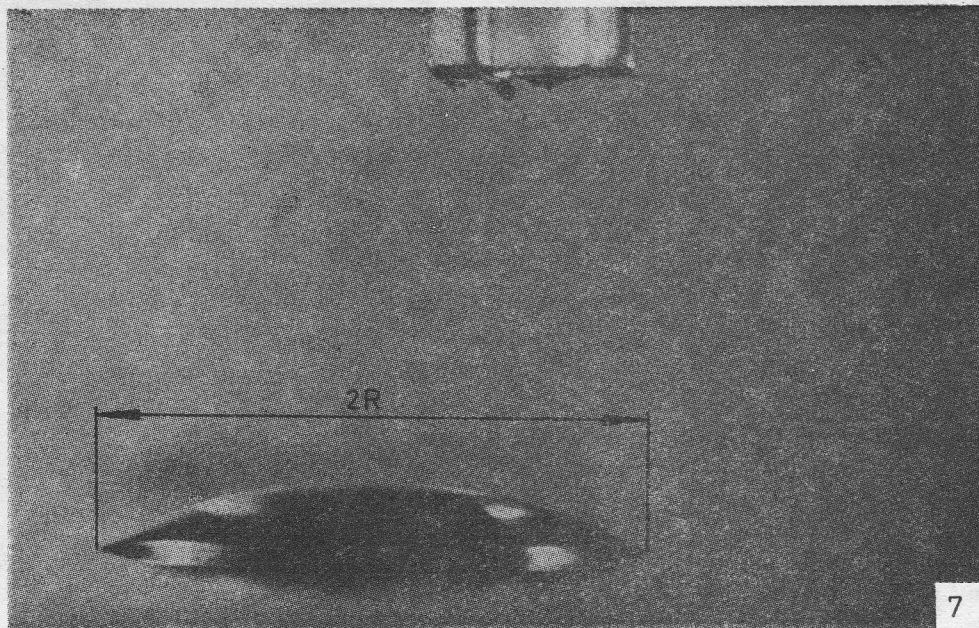
Rys. 2—4. Cykl odparowania kropli wody z powierzchni płaskiej ścianki ($T_w = 73,8^\circ\text{C}$, $\varphi = 24\%$, $T_{ot} = 22,8^\circ\text{C}$, $P_{ot} = 0,1030\text{ MPa}$)



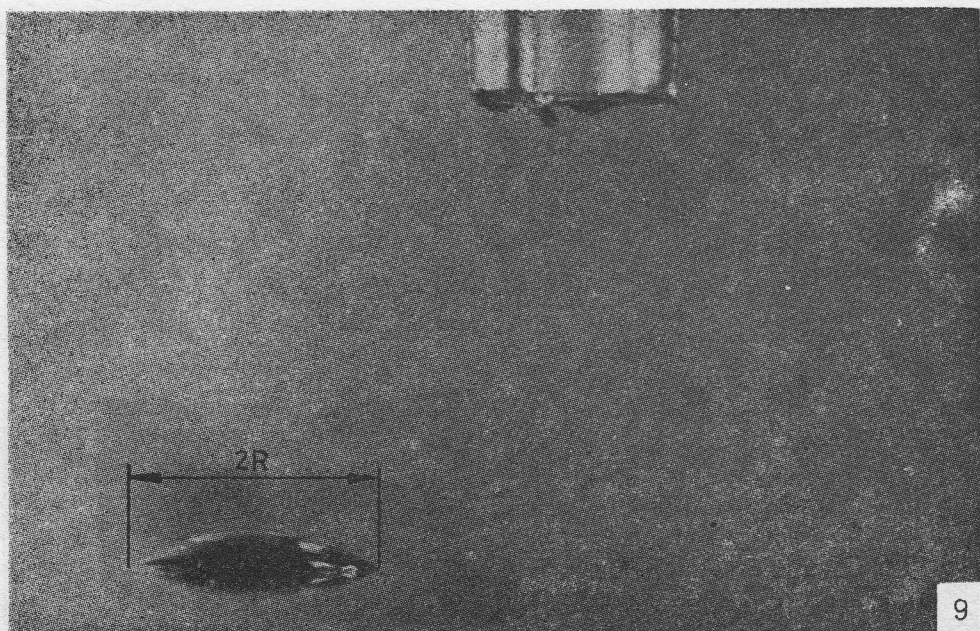
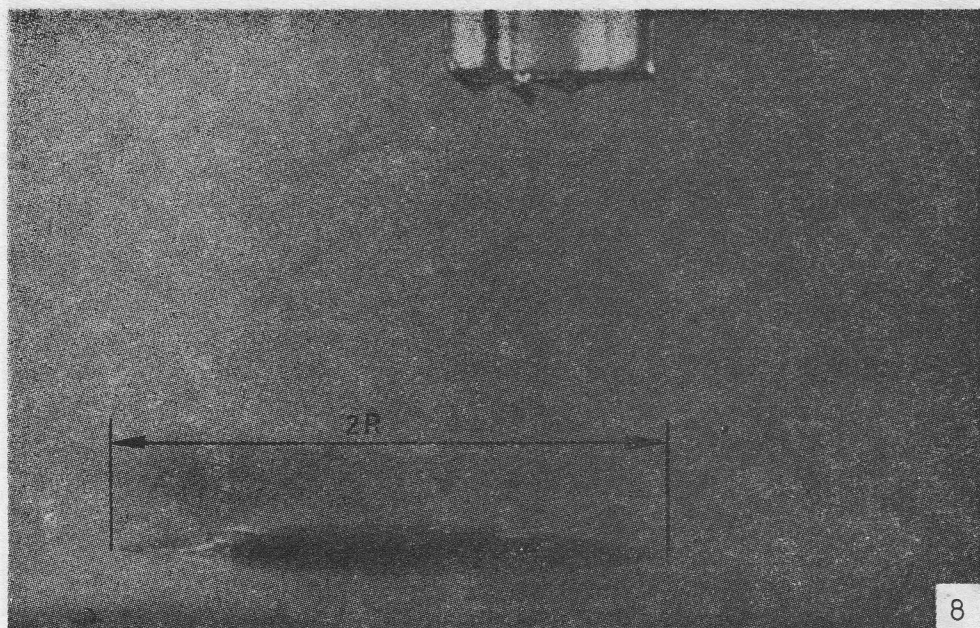
Rys. 5. Cykl odparowania kropli wody z powierzchni płaskiej ścianki ($T_w = 80,4^\circ\text{C}$, $\varphi = 23\%$, $T_{ot} = 23,8^\circ\text{C}$, $P_{ot} = 0,1030\text{ MPa}$)



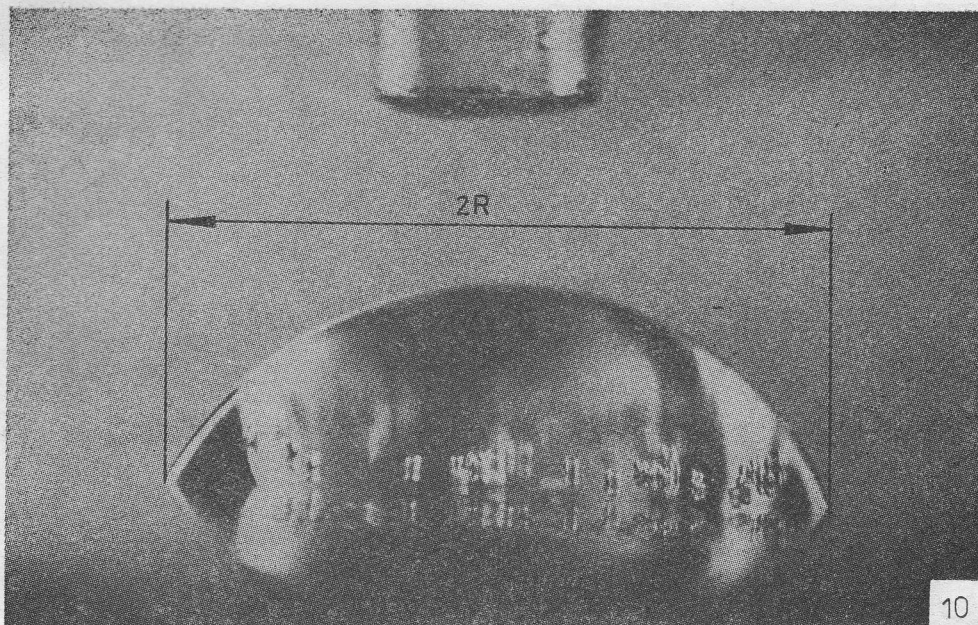
6



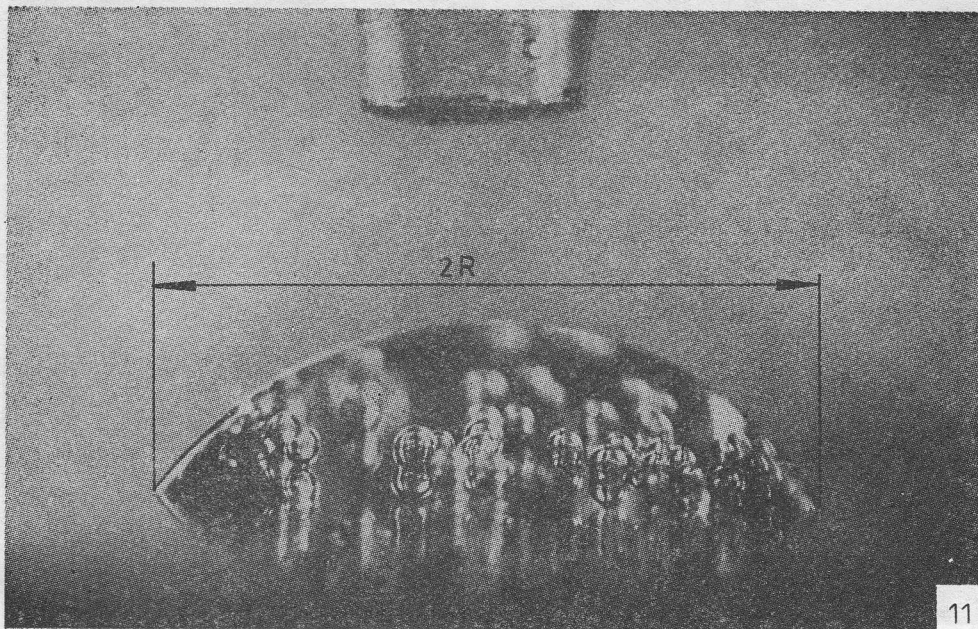
7



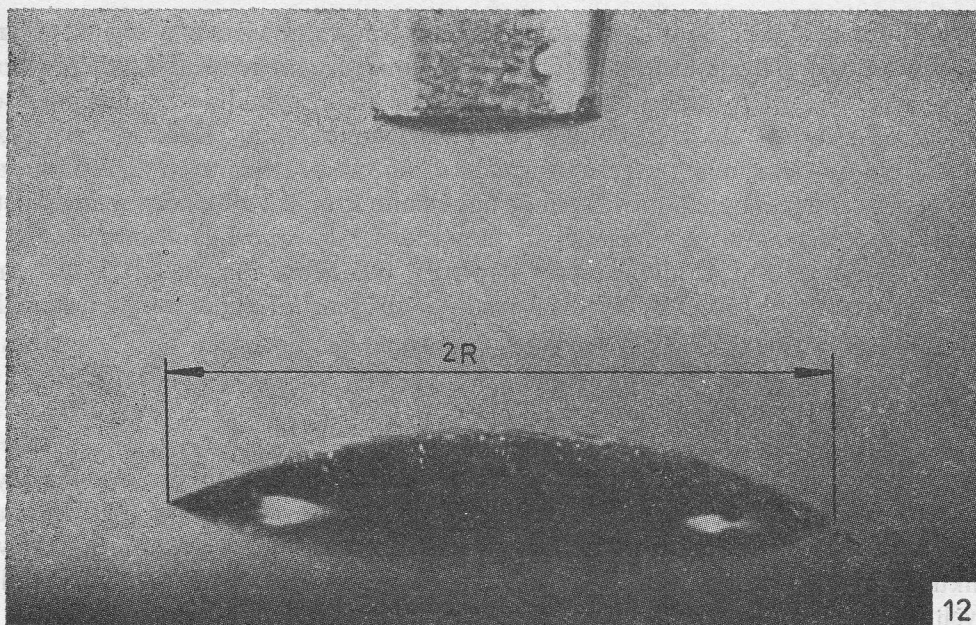
Rys. 6—9. Cykl odparowania kropli wody z powierzchni płaskiej ścianki ($T_w = 80,4^\circ\text{C}$, $\varphi = 23\%$,
 $T_{ot} = 23,8^\circ\text{C}$, $P_{ot} = 0,1030\text{ MPa}$)



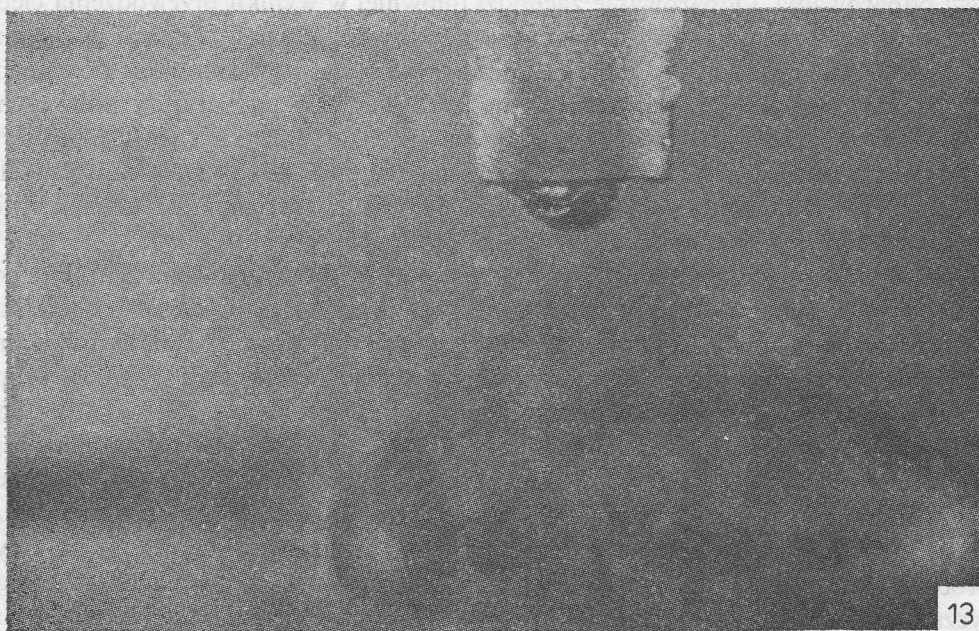
10



11



Rys. 10—12. Cykl odparowania kropli wody z powierzchni płaskiej ścianki ($T_w = 92,0^\circ\text{C}$, $\varphi = 21\%$,
 $T_{ot} = 27,7^\circ\text{C}$, $P_{ot} = 0,1027 \text{ MPa}$)



Rys. 13. Faza odparowania kropli wody z powierzchni płaskiej ścianki ($T_w = 122,5^\circ\text{C}$, $\varphi = 23,0\%$,
 $T_{ot} = 24,2^\circ\text{C}$, $P_{ot} = 0,1026 \text{ MPa}$)

ratury oraz osiągnięcie stanu ustalonego. Temperaturę powierzchni ścianki wyznaczono metodą ekstrapolacji, posługując się numerycznym rozwiązaniem równania aproksymacyjnego rozkładu temperatury wzdłuż części cylindrycznej grzejnika. dla odległości zerowej odpowiadającej jego powierzchni roboczej. Każdorazowo przed pomiarem powierzchnię czyszczono w celu usunięcia ewentualnych zanieczyszczeń. Na oczyszczoną i ogrzaną powierzchnię nakładano kroplę (za pomocą mikropipety). Każdą kroplę podczas procesu odparowania fotografowano kilkakrotnie (4—8 razy). W badaniach użyto mikropipety (typu FP 005 firmy Plastomed), która umożliwiała uzyskanie kropli o objętości rzędu $5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3$. Temperatury powierzchni zmieniały się w zakresie od 70 do 125°C .

4. Wyniki badań doświadczalnych

Przeprowadzone badania pozwoliły uzyskać cykl fotografii przedstawiających odparowanie pojedynczej kropli dla różnych temperatur powierzchni płaskiej ścianki. Zastosowanie światła rozproszonego umożliwiło pokazanie wnętrza kropli. W wyniku badań uzyskano około 300 fotografii (50 cykli odparowania kropeł). Analiza tych fotografii potwierdziła wcześniejsze przypuszczenia, że krople po osadzeniu na powierzchni i podczas odparowania, posiadają kształt zbliżony do czaszy kulistej (patrz rys. 2—12). Stwierdzono również, że w zależności od temperatury powierzchni ścianki, odparowanie kropli do powietrza może mieć różny charakter. Na rysunkach 2—4 pokazano odparowanie kropli zachodzące wyłącznie na jej zewnętrznej powierzchni. Ten typ odparowania kropli odpowiada przyjętemu w pracy [4] modelowi odparowania. Odparowanie zachodzi (głównie) w wyniku przewodzenia ciepła przez kroplę. Rysunki 5—9 przedstawiają odparowanie kropli w chwili pojawienia się pierwszych pęcherzyków pary, które mogą odrywać się od podłoża pod kroplą i podążać do jej zewnętrznej powierzchni. Podwyższenie temperatury powierzchni ścianki prowadzi do powstania większej liczby pęcherzyków pary, tworzących się w obszarze zetknięcia kropli z powierzchnią ścianki (rys. 10—12). Dalszemu wzrostowi temperatury towarzyszy tak intensywne odparowanie kropli, że obserwacja zmiany kształtu kropli jest utrudniona (rys. 13).

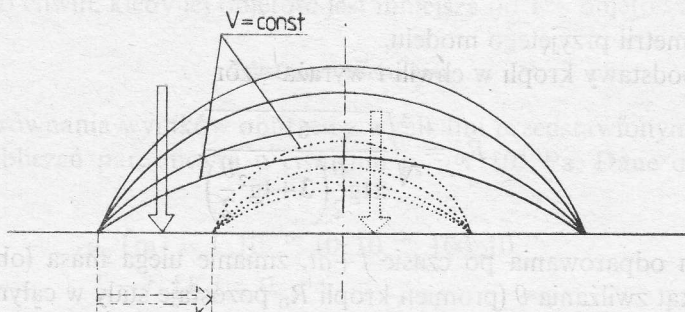
Podczas badań zaobserwowano, że przebieg procesu odparowania charakteryzuje się występowaniem etapów odparowania kropli przy czym w czasie trwania każdego z etapów kropla zachowuje stałą powierzchnię podstawy (tj. stałą powierzchnię zwilżania ciecz—ciało stałe). W wyniku odparowania zmiana ulega wysokość kropli, a więc i kąt zwilżania θ . Po osiągnięciu pewnej, dostatecznie małej, wartości kąta zwilżania następuje proces „zbiegnięcia się” kropli. Powstaje „nowa” kropla posiadająca kształt zbliżony do czaszy kulistej, ale jej powierzchnia podstawy jest znacznie mniejsza. To zbiegnięcie kropli wykazuje cechy nagłej utraty stabilności i przebiega w sposób praktycznie natychmiastowy. Oznacza to, że zachowana jest w tym procesie stała objętość cieczy. Kolejny etap odparowania kropli przebiega w identyczny sposób jak podano powyżej, ale przy zachowaniu już zmniejszonej powierzchni podstawy kropli (rys. 5—9).

Przedstawiony przebieg procesu nie obejmuje końcowego, bardzo krótkiego,

okresu ostatecznej dezintegracji kropli, który był trudny do zaobserwowania. Ten ostatni etap nie ma istotnego wpływu na wartość czasu odparowania kropli. Zaznaczyć należy, że etapowy przebieg procesu odparowania kropli i zmian kształtu kropli w każdym etapie zachodzi tak samo, bez względu na to, czy wewnątrz kropli istnieją pęcherzyki pary, czy też ich nie ma.

5. Skorygowany model przebiegu zjawiska odparowania kropli

Na podstawie zaobserwowanego przebiegu zjawiska odparowania kropli skorygowano model tego zjawiska przedstawiony w pracy [4]. Podstawowe założenie modelu z pracy [4] zachowano. Założenie to dotyczy mechanizmu przekazywania ciepła między powierzchnią ścianki a wolną powierzchnią kropli, tzn. ciepło przekazywane jest na drodze przewodzenia przez kroplę. Kosztem tego ciepła następuje odparowanie cieczy z powierzchni kropli przy założeniu, że kropla jest czaszą kulistą.



Rys. 14. Model przebiegu zjawiska odparowania kropli z powierzchni płaskiej ścianki

———— I etap odparowania kropli, ———— skokowa zmiana kształtu kropli, II etap odparowania kropli

W przeciwieństwie do pracy [4] przyjęto tu, że kropla odparowuje etapami charakteryzującymi się utrzymaniem stałej powierzchni podstawy kropli (czaszy kulistej). Przejście od jednego etapu odparowania do drugiego następuje w momencie braku stabilności na granicy faz ciało stałe—ciecz—gaz. Proces „przeskoku” przebiega tak szybko, że słuszne jest założenie o zachowaniu stałej objętości ($V = \text{idem}$) w czasie jego trwania. Taki model przebiegu zjawiska pokazano schematycznie na rys. 14.

6. Sposób obliczania czasu odparowania kropli z powierzchni płaskiej

Poniżej przedstawiono sposób obliczania czasu odparowania kropli z uwzględnieniem wprowadzonych modyfikacji założeń modelu zjawiska. Zależności zawarte w pracy [4], pozwalające wyznaczyć całkowity czas odparowania kropli, pozostają słuszne po wykonaniu poniższych przekształceń.

W określonej chwili czasu t wartość strumienia masy określa zależność:

$$\dot{m}(t) = \frac{S}{v_l} \sqrt[3]{V(t)}, \quad (1)$$

gdzie

$$S = CE\xi(T_{wo} - T_s) - FH(T_s - T_v), \quad (2)$$

a

$$C = \frac{\pi v_l \lambda_l}{3b}, \quad F = \frac{2\pi v_v \lambda_v}{b}, \quad (3)$$

charakteryzują własności ośrodków, zaś

$$E = \frac{6}{\sin \theta} \int_0^\theta \frac{\sin^2 \alpha}{(\cos \alpha - \cos \theta) \alpha} \left(1 - \frac{\sin^2 \alpha}{\sin^2 \theta}\right)^3 \sqrt{\frac{6}{\pi \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \left(3 + \operatorname{tg}^2 \frac{\theta}{2}\right)}} d\alpha, \\ H = \sqrt[3]{\frac{6}{\pi \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \left(3 + \operatorname{tg}^2 \frac{\theta}{2}\right)}} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}. \quad (4)$$

zależą od geometrii przyjętego modelu.

Promień podstawy kropli w chwili t wyraża wzór

$$R_0 = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \left(3 + \operatorname{tg}^2 \frac{\theta}{2}\right)}}. \quad (5)$$

W wyniku odparowania po czasie $t + dt$, zmiana ulega masa (objętość) kropli, a więc także kąt zwilżania θ (promień kropli R_0 pozostaje stały w całym etapie odparowania). Nową wartość kąta zwilżania można otrzymać z równania (5) przekształconego do postaci

$$\operatorname{tg}^3 \frac{\theta}{2} + 3 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - \frac{6V}{\pi R_0^3} = 0. \quad (6)$$

Rozwiązanie Cardana równania (6) przy warunku

$$\sqrt{1 + \left(\frac{6V}{\pi R_0^3}\right)^2} > 0 \quad (7)$$

można zapisać w formie

$$\theta = 2 \arctg(B_1 + B_2), \quad (8)$$

gdzie

$$B_1 = \sqrt[3]{\frac{3V}{\pi R_0^3} + \sqrt{1 + \left(\frac{6V}{\pi R_0^3}\right)^2}}, \\ B_2 = \sqrt[3]{\frac{3V}{\pi R_0^3} - \sqrt{1 + \left(\frac{6V}{\pi R_0^3}\right)^2}} \quad (9)$$

Zmiana kąta zwilżania θ w czasie procesu odparowania powoduje, że wartość S

określona wzorem (2) jest również zmienną w czasie. Zatem całkowanie zależności (1) w granicach $t = 0$ do $t = t_k$ w celu otrzymania prostego rozwiązania (tak jak to miało miejsce w pracy [4]) nie jest możliwe. Równanie (1) można rozwiązać jedynie w sposób przybliżony stosując procedury numeryczne.

7. Wyniki obliczeń numerycznych

7.1. Sposób wykonania obliczeń czasu odparowania

Rozwiązanie równania (1) wymaga założenia, że przy nieciągłym odparowaniu kropla zmienia skokowo swoją objętość i kąt zwilżania. W związku z tym czas odparowania kropli można wyznaczyć jako sumę odcinków czasowych zmian tych parametrów. Założono, że względna zmiana objętości $\Delta V/V$ w jednym kroku czasowym jest zawarta w granicach $2 \div 4\%$ objętości bieżącej. Przyjęto również, że kropla odparowuje do chwili, kiedy jej objętość jest mniejsza od 1% objętości początkowej.

7.2. Dane obliczeniowe

W celu porównania wyników obliczeń z wynikami przedstawionymi w pracy [4] przyjęto do obliczeń parę mokrą o ciśnieniu $p_s = 1 \cdot 10^4$ Pa. Dane do obliczeń są następujące:

$$\begin{aligned} \varrho_0 \text{ [m]} &= 1 \cdot 10^{-6}, 10 \cdot 10^{-6}, 100 \cdot 10^{-6} \\ T_s - T_v \text{ [K]} &= 0, \\ T_{wo} - T_s \text{ [K]} &= 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, \\ \theta \text{ [}^\circ\text{]} &= 30, 60, 90, \\ \xi &= 1, 0. \end{aligned}$$

7.3. Wyniki obliczeń i porównanie z wynikami [4]

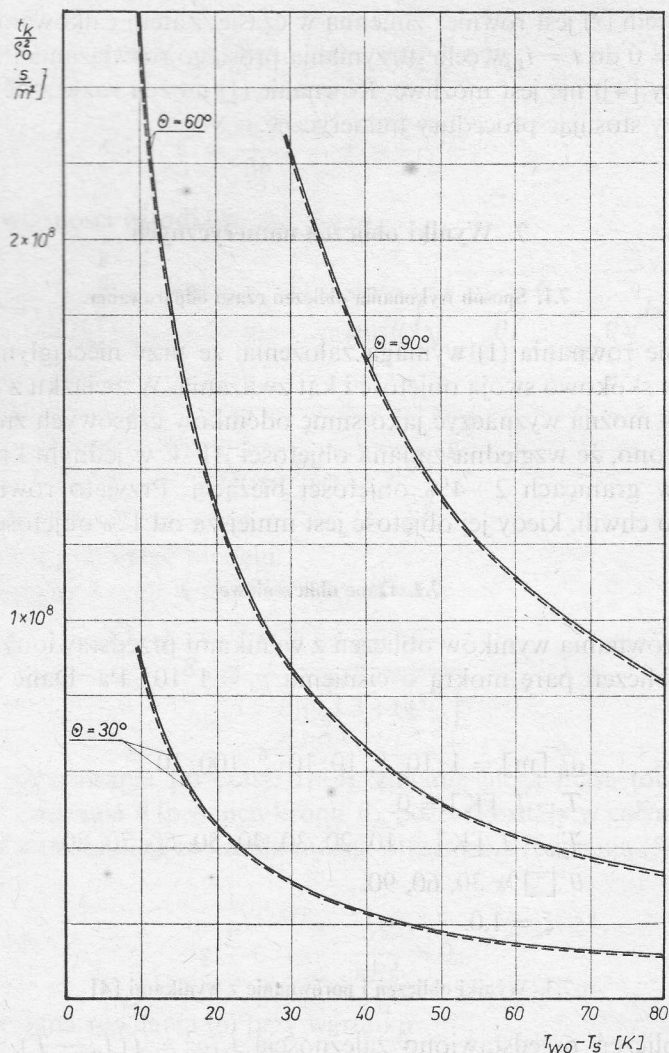
Wyniki obliczeń przedstawiono zależnością $t_k/\varrho_0^2 = f(T_{wo} - T_s)$. Umożliwiło to wykreślenie tylko jednej krzywej odparowania dla kropeł różnej wielkości. Na rysunku 15 przedstawiono przebieg krzywych odparowania obliczonych z dotychczasowego i zmodyfikowanego modelu czaszy kulistej dla różnych wartości kąta zwilżania.

8. Wnioski

a. Stwierdzono, że odparowanie kropli przebiega etapami i w żadnym z etapów nie ulega zmianie pole powierzchni zetknięcia ciecz—ciało stałe.

b. Zaobserwowano pojawienie się wewnątrz kropli pierwszych pęcherzyków pary przy temperaturze powierzchni ścianki przekraczającej temperaturę bliską 74°C .

c. Zaproponowano modyfikację modelu zjawiska i metody obliczeniowej. Wy-



Rys. 15. Zależność czasu odparowania kropli od różnicy temperatur $T_{w0} - T_s$ i kąta zwilżania θ

————— sposób obliczania według pracy [4] ————— zmodyfikowany sposób obliczania według (1)–(9)

konane obliczenia numeryczne pozwoliły stwierdzić, że czasy odparowania obliczone metodą opartą na zmodyfikowanym modelu zjawiska są prawie takie same jak te podane w pracy [4]. Pełniejsza weryfikacja modelu zjawiska i metody obliczeniowej będzie możliwa dopiero przy użyciu metod rejestrujących jego przebieg.

Literatura

- [1] Bonacina C., Del Giudice S., Comini G., *Dropletwise evaporation*. Journal of Heat Transfer, Vol. 101 (1979), s. 441–446.
- [2] Grissom W. M., Wierum F. A., *Liquid spray cooling of a heated surface*. Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 24 (1981), s. 261–271.

- [3] Konorski A., Zapałowicz Z., *Ocena możliwości odparowania kropeł z powierzchni wewnętrznie podgrzewanych łopatek kierowniczych turbin*. XII Zjazd Termodynamików, Materiały Zjazdowe. Część I, Kraków—Rytro, wrzesień 1984, s. 428—432.
- [4] Zapałowicz Z., *Przybliżona metoda wyznaczania czasu odparowania kropli z powierzchni płaskiej*. Archiwum Termodynamiki, 5 (1984), s. 149—162.

Фотографические исследования и оценка времени испарения капли воды из поверхности плоской стенки

Резюме

В работе представлены экспериментальный стенд и результаты фотографических исследований процесса испарения одиночной капли воды из поверхности плоской стенки в атмосферу влажного воздуха. Анализ полученных фотографий привёл к выводу, что процесс испарения капли осуществляется по этапам. В каждом этапе испарения капли сохраняется постоянная поверхность соприкосновения жидкости со стенкой. Изменению подвергается единственно высота капли. Переход от одного этапа испарения к следующему осуществляется внезапно в момент потери устойчивости на границе фаз газ-жидкость-твёрдое тело. Наблюдённый ход процесса испарения капли позволил сформулировать физическую модель этого явления и модифицировать метод расчёта времени её испарения, представленный в работе [4].

Evaporation of Water Droplet from the Flat Wall Surface — Investigations Based on Photographs and Estimation of the Evaporation Time

Summary

The paper concerns the problem of evaporation of a single droplet of water from a flat wall surface to the atmosphere of humid air. The experimental stand and results of investigations based on photographs are presented. It follows from the analysis of photographs that the droplet evaporates by stages each of which is characterized by fixed surface of contact of liquid with the wall. In a single stage of evaporation only the droplet height changes. The transition from one stage to another occurs rapidly at the moment of the loss of stability at the gas-liquid-solid phase boundary. The course of droplet evaporation with time has allowed to formulate a physical model of the phenomenon and modify the method as presented elsewhere [4] for calculating the evaporation.