

BIULETYN INFORMACYJNY

INSTYTUTU TECHNIKI CIEPLNEJ

POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

WARSZAWA

TEL. 215021 w. 32 i 48

NOWOWIEJSKA 25

Nr 9/K.T.M.C.9

lipiec 1967

Dr inż. Wiesław Rybka
Katedra Teorii Maszyn Ciepłych.

BADANIE I ANALIZA

OPTYMALNYCH WARUNKÓW WYMIANY CIEPŁA PRZY WRZENIU

WODY ZE SKŁADNIKIEM ORGANICZNYM

Wykaz oznaczeń

T	- temperatura	$^{\circ}\text{C}$
T_n	- temperatura nasycenia	$^{\circ}\text{C}$
ΔT_x	- różnica temperatur powierzchni grzejnej i wrzącej cieczy	$^{\circ}\text{C}$
q	- strumień cieplny	kcal/hm^2
q_{kr1}	- strumień cieplny w warunkach pierwszego kryzysu wrzenia	kcal/hm^2
D_p	- średnica pęcherzyka w momencie oderwania od powierzchni grzejnej	mm, m
D_x	- średnica pęcherzyka bieżąca w czasie	mm, m
τ	- czas wzrostu pęcherzyka	sek, h
τ_{max}	- czas wzrostu pęcherzyka do momentu oderwania	
p	- ciśnienie	ata
X_c	- stężenie składnika organicznego w wodzie	%
α	- współczynnik przejmowania ciepła	$\text{kcal}/\text{hm}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$

λ_c	- współczynnik przewodności cieplnej cieczy	kcal/hm °C
δ_A	- dynamiczny współczynnik dyfuzji	kg/m ₂ h
δ_{gA}	- ciężar właściwy pary składnika org.	kg/m ³
r_A	- ciepło parowania składnika organicznego	kcal/kg
Nu	- liczba Nusselta	
Sc	- liczba Schmidta	
Pr	- liczba Prandtla	
ν_c	- współczynnik kinematyczny lepkości	m ² /h
δ_c	- ciężar właściwy cieczy	kg/m ³
ρ_g	- gęstość pary	kg/m ³
ρ_c	- gęstość cieczy	kg/m ³
r_c	- ciepło parowania cieczy	kcal/kg
σ_c	- napięcie powierzchniowe cieczy	kg/m
β	- kąt zwilżalności	°
$\Delta\pi_A$	- moduł napędowy dyfuzji	

1. W s t ę p

Omówione niżej badania stanowią kontynuację prac dotychczas przeprowadzonych (1), które dały szereg informacji o przebiegu zjawiska wymiany ciepła przy wrzeniu wody ze składnikiem organicznym. Ustalono wówczas między innymi, że istnieją tzw. stężenia optymalne, przy których wartości strumienia cieplnego w warunkach pierwszego kryzysu wrzenia są największe. W stężeniach tych ma miejsce najmniejsze tempo wzrostu pęcherzyków. Wielkość odrywających się od powierzchni grzejnej pęcherzyków jest także w tym przypadku najmniejsza. Ponadto zaobserwowano, że zjawisko optymalnych warunków wymiany ciepła w pewnym określonym stężeniu zachodzi nie tylko na drucie platynowym, ale także na płaskiej stalowej powierzchni grzejnej.

Celem poprzednich badań było zebranie informacji doświadczalnych o zjawisku, których to danych było brak w literaturze, co uniemożliwiało dotychczas podjęcie próby teoretycznego wyjaśnienia przyczyn powstawania stężenia optymalnego. Badania przeprowadzone w ramach poprzedniej pracy dotyczyły ciśnienia atmosferycznego. Okazało się jednak, że zakres zmienności sta-

łych fizycznych i liczb bezwymiarowych przy ciśnieniu atmosferycznym jest stosunkowo niewielki, co uniemożliwiało podjęcie starań dla teoretycznego uogólnienia wyników. Z tego względu rozszerzono badania eksperymentalne i przeprowadzono je przy ciśnieniach wyższych od atmosferycznego, tj. 1 - 25 ata dla uzyskania większego zakresu zmienności wszystkich tych parametrów, które mają istotny wpływ na wyjaśnienie warunków fizykalnych powstawania zjawiska stężenia optymalnego, oraz określenia zależności uogólnionych wymiany ciepła i zależności określającej wartość strumienia ciepłego w warunkach pierwszego kryzysu wrzenia.

Stosunkowo częste występowanie wymiany ciepła przy wrzeniu w różnych urządzeniach technicznych, skłoniły do przeprowadzenia odpowiednich badań eksperymentalnych oraz do podjęcia próby wyjaśnienia fizykalnych warunków powstawania omawianego zjawiska.

2. Dotychczasowe osiągnięcia z dziedziny wymiany ciepła przy wrzeniu wody ze składnikiem organicznym

Zjawisko wzrostu wartości strumienia ciepłego oraz współczynnika przejmowania ciepła w warunkach pierwszego kryzysu wrzenia cieczy dwuskładnikowej ponad wartości q_{krI} ; α_{krI} dla czystych składników jest znane od około 15 lat. Zostało ono stwierdzone najwcześniej przez Bonilla'ego i Eisenberga (2); badania prowadzili również Kirschbaum (3), Cichelli i Bonilla (4) oraz Bonilla i Perry (5).

Najbardziej systematyczne przebadanie wpływu koncentracji na maksymalne wartości strumieni ciepłych w warunkach pierwszego kryzysu wrzenia zostało dokonane w pracach Van Vosa i Van Strahlena (6), którzy jednak, poza zebraniem częściowych informacji eksperymentalnych o zjawisku dla kilku mieszanin wody i składników organicznych, nie podjęli próby teoretycznego wyjaśnienia zjawiska. Podobnie w nowszych badaniach nad tym zagadnieniem przeprowadzonych przez J.Hovestreitda (7) rozszerzono jedynie zakres doświadczeń z częściowym uwzględnieniem zmian napięcia powierzchniowego, jednak bez przebadania wpływu na zjawisko zmian stałych fizycznych przy różnych

składnikach organicznych i stężeniach oraz nie przeprowadzono rozważań teoretycznych. Dotyczy to również prac J.F.Richardsona (8) oraz Pang Sheng Li (9).

Słabą stroną informacji zawartych w wymienionych pracach jest to, że są one niepełne, zwłaszcza jeżeli chodzi o przebadanie zjawisk towarzyszących, istotnych dla zagadnienia wymiany ciepła przy wrzeniu. Nie uwzględniają one danych odnośnie przebiegu zależności wymiany ciepła, wpływu zmian stężenia na dynamikę wzrostu pęcherzyków, zmian napięcia powierzchniowego kąta zwilżalności itp. Wyniki uzyskane przez w.w. autorów dotyczą jedynie eksperymentów prowadzonych przy niskich ciśnieniach poniżej kilku atmosfer, z tego względu są one niewystarczające dla przeprowadzenia dociekań teoretycznych ze względu na małą zmienność parametrów wpływających na zjawisko. Niezależnie od tego odczuwa się brak w literaturze danych o stałych fizycznych dla mieszanin wody ze składnikami organicznymi, dotyczy to współczynników przewodzenia ciepła, dyfuzji, prężności par i napięcia powierzchniowego.

Powyżej opisany stan niedostatecznych danych eksperymentalnych dotyczących omawianego zjawiska stanowi przyczynę nieuzyskania dotychczas teoretycznego wyjaśnienia, jak również nieustalenia uogólnionych równań wymiany ciepła. Pewne fragmentaryczne próby teoretycznych opracowań zostały opublikowane przez L.N.Grigoriewa (10) oraz A.G.Usmanowa (11). Nie uwzględniają one zmian pod wpływem stężenia takich wielkości jak: napięcia powierzchniowe, zwilżalność, dyfuzja, szybkość wzrostu pęcherzyków. Są to zależności uproszczone, nie uwzględniające również szczególnych warunków wymiany ciepła w stężeniach optymalnych. Podobnie najnowsze badania Hovestreitda i Van Strahlena (12) podają wyniki fragmentaryczne bez uwzględnienia zjawisk towarzyszących, dotyczących dynamiki wzrostu pęcherzyków.

3. Cel i zakres badań

Badania niniejsze stawiają sobie za cel zebranie danych eksperymentalnych o zjawisku w zakresie umożliwiającym stwierdzenie czy może być ono stosowane w technice oraz zebranie

tych danych eksperymentalnych, które umożliwiłyby podjęcie próby teoretycznego ujęcia zagadnienia i opracowania uogólnionych równań wymiany ciepła i określania wartości strumienia cieplnego w warunkach pierwszego kryzysu wrzenia, jak również wyjaśnienia przyczyn powstawania warunków optymalnej wymiany ciepła przy pewnych stężeniach składnika organicznego w wodzie.

Do badań przyjęta została grupa związków organicznych, które to związki po wprowadzeniu do wody przy pewnym stężeniu powodują znaczne zwiększenie wartości strumienia cieplnego w porównaniu z tymi wielkościami dla czystych składników. Przy wyborze substancji organicznych przeznaczonych do badań brano pod uwagę ich właściwości pod względem wielkości omawianego efektu. Badania przeprowadzone poprzednio wykazały, że niektóre substancje organiczne przedstawiają się mniej interesująco z punktu widzenia wymiany ciepła. Do badań przyjęto zestaw substancji organicznych, posiadających najsilniejsze własności zwiększania wartości strumienia cieplnego, a mianowicie keton metyloetylowy o wzorze $\text{CH}_3\text{CO C}_2\text{H}_5$ i temperaturze wrzenia przy ciśnieniu atmosferycznym $79,6^\circ\text{C}$, alkohol butylowy IV rz. o wzorze $\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$ i temperaturze wrzenia przy ciśnieniu atmosferycznym $82,5^\circ\text{C}$, alkohol n-propylowy o wzorze $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ i temperaturze wrzenia przy ciśnieniu atmosferycznym $97,2^\circ\text{C}$ oraz alkohol metylowy o wzorze CH_3OH i temperaturze wrzenia przy ciśnieniu atmosferycznym $64,7^\circ\text{C}$.

Mając na względzie uzyskanie danych eksperymentalnych zarówno dla potrzeb technicznych jak i dla rozważań teoretycznych badania przeprowadzono przy ciśnieniach 1 ata, 5 ata, 10 ata, 15 ata i 25 ata., co pozwala na uzyskanie znacznego zakresu zmienności wielkości opisujących zjawisko.

Pomiarami doświadczalnymi objęto zmiany pod wpływem dodatku składnika organicznego takich wielkości jak strumień cieplny, przegrzanie powierzchni grzejnej, szybkość wzrostu pęcherzyków, czas wzrostu pęcherzyków do momentu oderwania oraz niektórych stałych fizycznych.

Badania eksperymentalne prowadzono na drucie platynowym, pracującym jako grzejno oporowy oraz na płaskiej powierzchni stalowej dla uzyskania wyników z ewentualnym przeznaczeniem

dla zastosowań technicznych. Doświadczenie prowadzono głównie w obszarze stężeń optymalnych. Natomiast pod względem teoretycznym praca zakreśla sobie znalezienie modelu fizykalnego powstawania optymalnych warunków wymiany ciepła oraz ustalenia uogólnionych równań wymiany ciepła. Badania przeprowadzono na urządzeniu opisanym przez autora (1). Urządzenie to zostało dodatkowo wyposażone dla prowadzenia badań przy ciśnieniu 25 ata.

4. Wyniki pomiarów dotyczące wielkości strumieni ciepłych i przegrzań powierzchni grzejnej tj. $q; \Delta T_x$

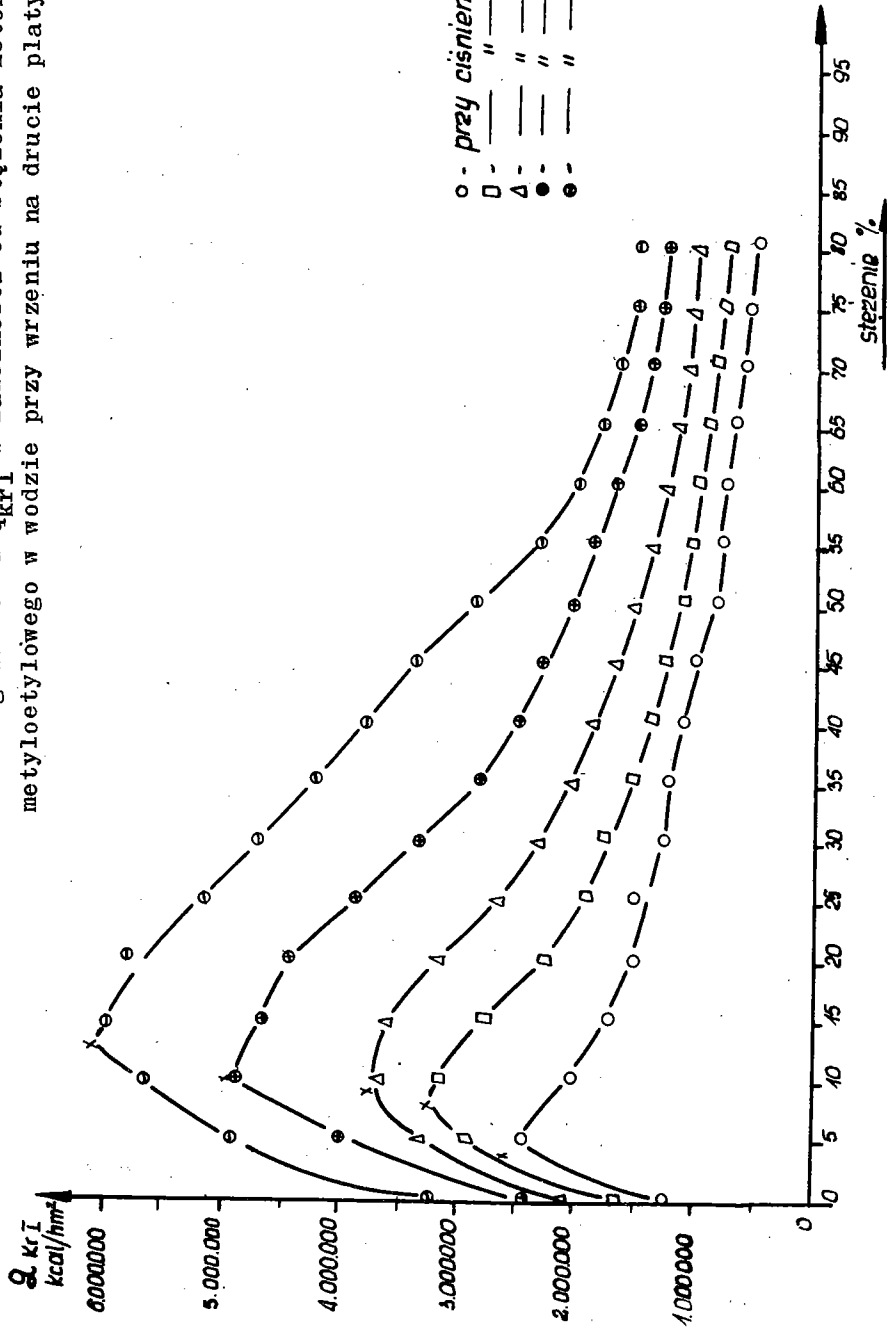
Przeprowadzone pomiary dotyczyły głównie tych zakresów stężeń, w których występują warunki optymalnej wymiany ciepła przy ciśnieniach 1, 5, 10, 15 i 25 ata.

W celu ustalenia wyżej wymienionych zakresów stężeń dokonano pomiarów q_{krI} dla wody z poszczególnymi składnikami organicznymi i przy wyżej podanych ciśnieniach. Nie określono w tym przypadku tzw. krzywych wrzenia, tj. zależności $q=f(\Delta T_x)$, lecz jedynie wartości q_{krI} , doprowadzając najczęściej do przepalenia grzejnika. Ustalenie maksymalnej wartości q_{krI} pozwala najlepiej wyznaczać stężenia optymalne. Wyniki tych pomiarów podają rysunki 1, 2. Określone w ten sposób zakresy stężeń, w których zawierały się stężenia optymalne, zostały następnie poddane bliższemu przebadaniu, polegającemu na wyznaczeniu eksperymentalnych przebiegów $q = f(\Delta T_x)$ z dokładnością stężeń co 1%.

Dla dokładniejszego określenia stężeń optymalnych, tj. z dokładnością do 0,1% wykonano dodatkowe pomiary q_{krI} , korzystając z uściślenia zakresów optymalnych uzyskanych w pomiarach wyznaczających $q = f(\Delta T_x)$. Dla tak określonych stężeń optymalnych zbadano przebiegi $q = f(\Delta T_x)_{opt}$ dla drutu platynowego. Przebiegi te podane są na rysunkach 3, 4.

W badaniach na płaskiej powierzchni stalowej określano również najpierw zakres stężeń bliskich stężeniu optymalnemu przez wyznaczanie q_{krI} z dokładnością stężenia do 5%, co podają przykładowo rysunki 5,6. Dla tak wyznaczonego zakresu stężeń uzyskiwano zależności eksperymentalne $q = f(\Delta T_x)$

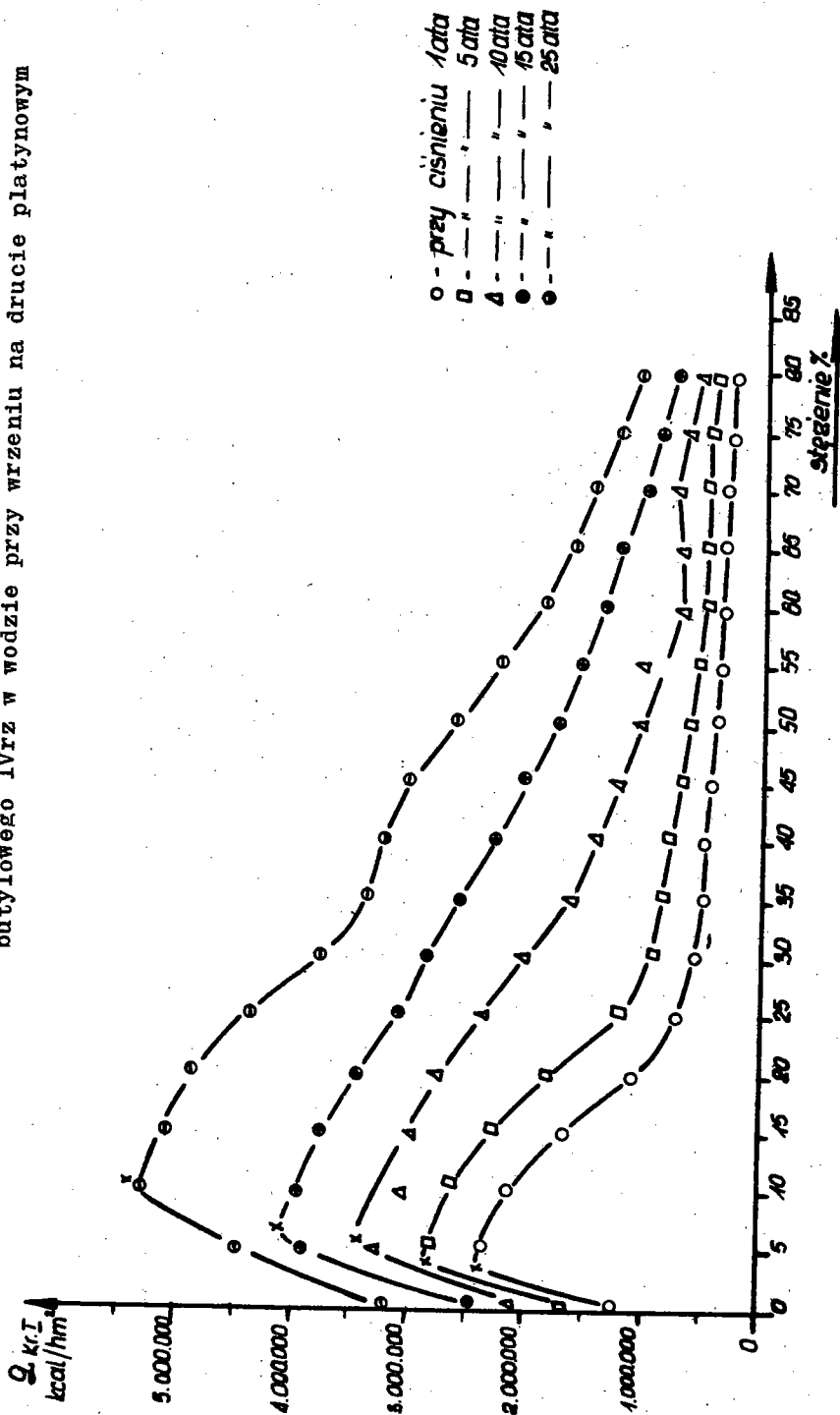
Przebieg wartości q_{krI} w zależności od stężenia ketonu metyloetylowego w wodzie przy wrzeniu na drucie platynowym



o - przy ciśnieniu 1ata
□ - " " 5ata
Δ - " " 10 ata
● - " " 15 ata
● - " " 25 ata

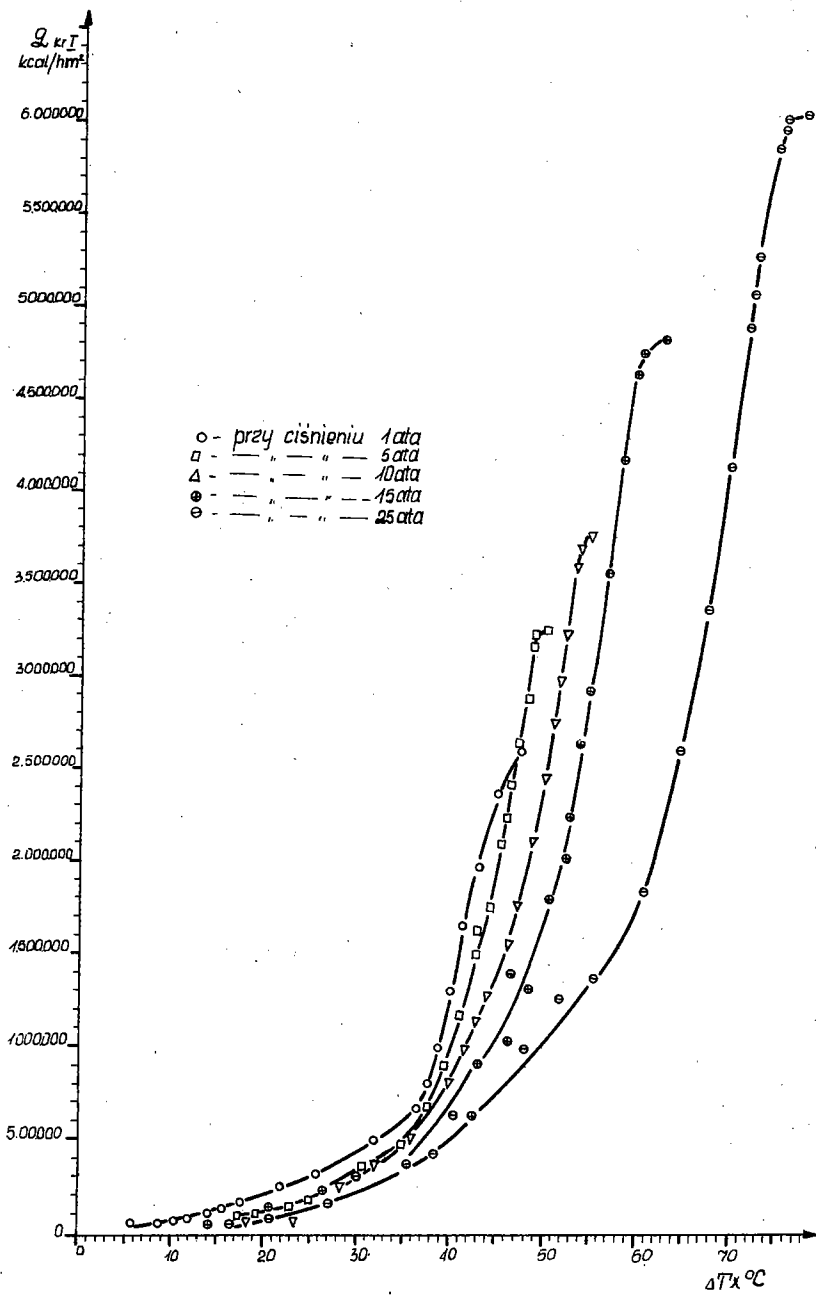
Rys. 1

Przebieg wartości q_{krI} w zależności od stężenia alkoholu butylowego IVr_z w wodzie przy wrzeniu na drucie platynowym



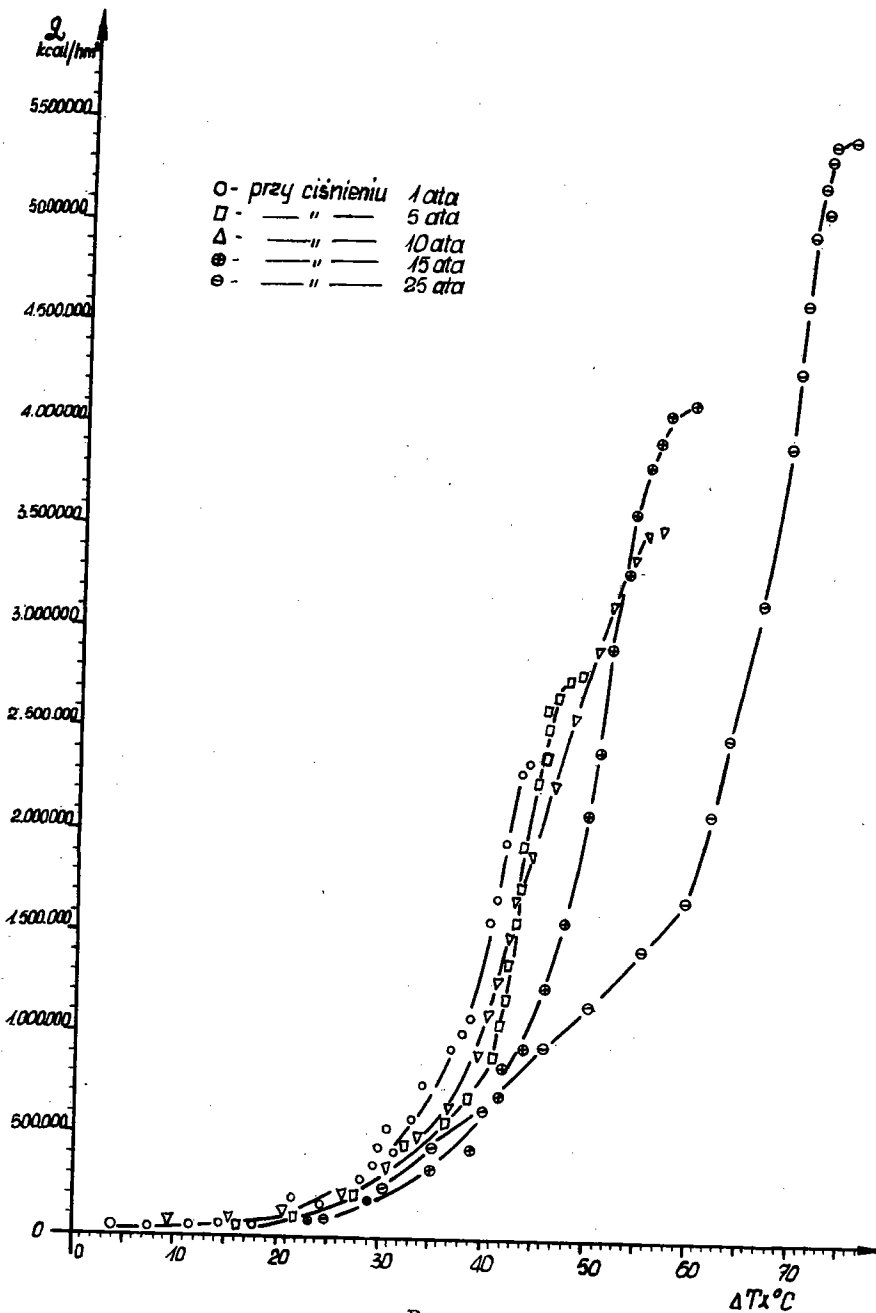
Rys. 2

Przebieg zależności eksperymentalnych $q=f(\Delta T_x)_{opt.}$ przy wrzeniu wody z ketonem metyloetylowym na drucie platynowym przy stężeniu optymalnym



Rys. 3

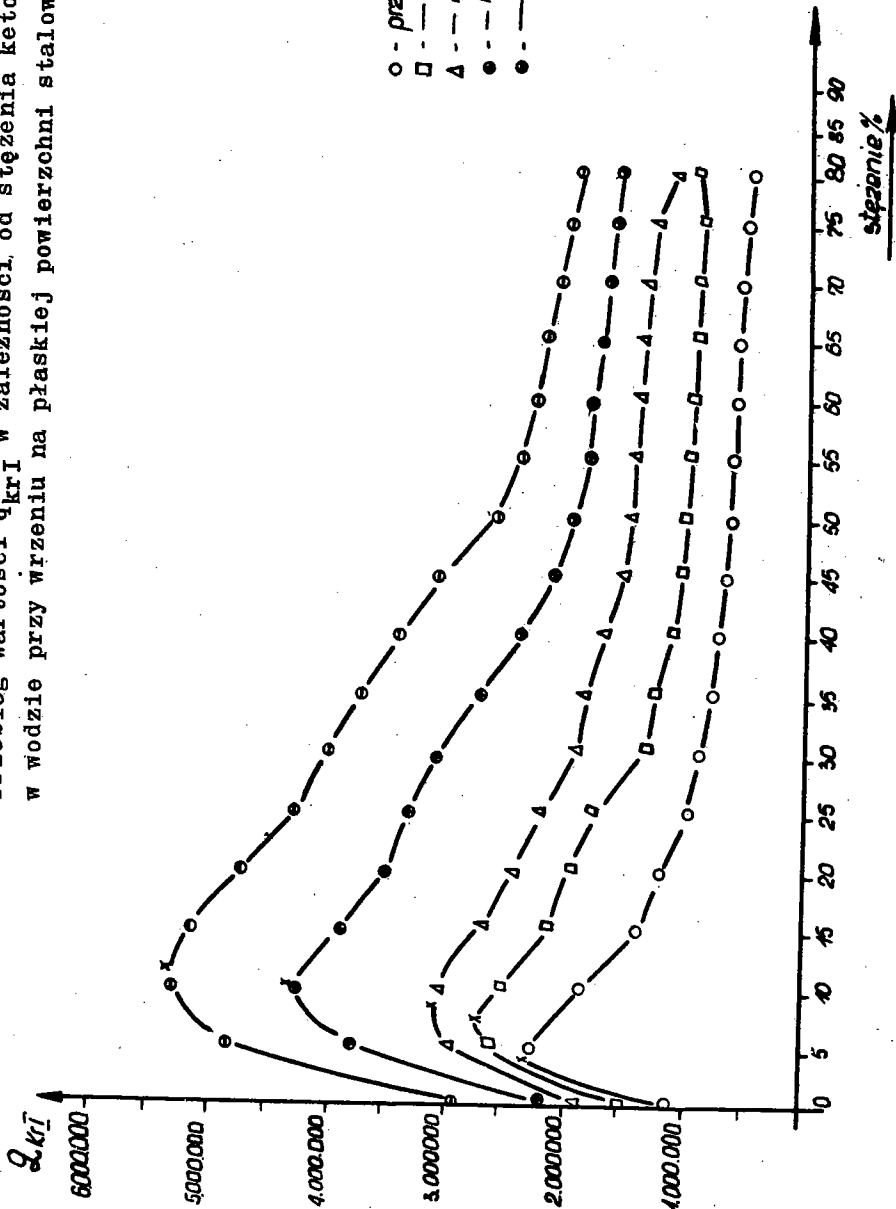
Przebieg zależności eksperymentalnych $q_{krf}(\Delta T_x)_{opt.}$ przy wrzeniu wody z alkoholem butylowym IVrz na drucie platynowym przy stężeniu optymalnym



Rys. 4

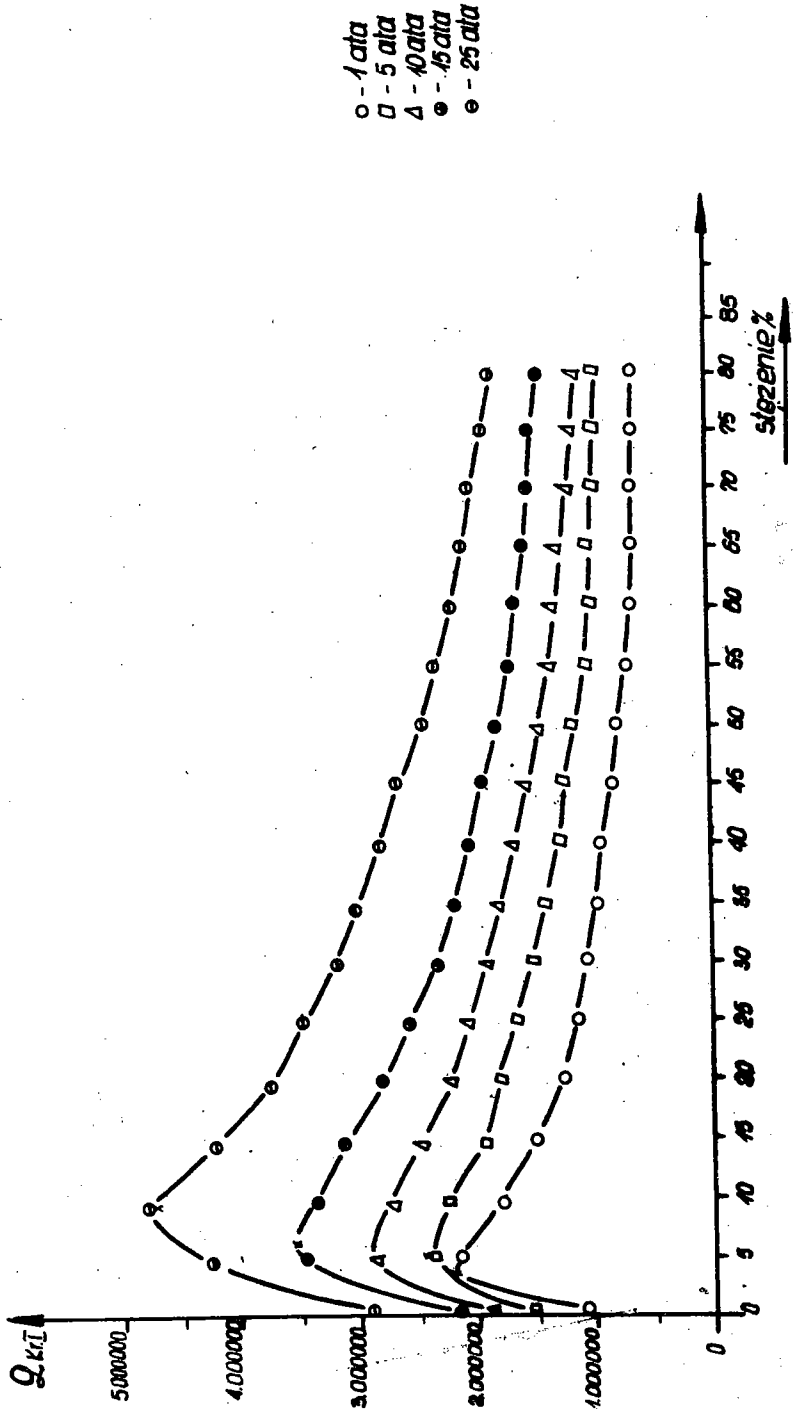
Przebieg wartości q_{krI} w zależności, od stężenia ketonu metylowego w wodzie przy wrzuceniu na płaskiej powierzchni stalowej

○ - przy ciśnieniu 1ata
 □ - " " " 5ata
 △ - " " " 10ata
 ● - " " " 15ata
 ● - " " " 25ata



Rvs.5

Przebieg wartości q_{kri} w zależności od stężenia alkoholu butylowego IVr3 w wodzie przy wrzeleniu na płaskiej powierzchni stalowej



Rys. 6

Wrzenie na drucie platynowym

Lp.	Rodzaj składnika organicznego w wodzie	Ciśnienie 1 ata		Ciśnienie 5 ata	
		X_{opt}	q_{krI} kcal/hm ²	X_{opt}	q_{krI} kcal/hm ²
1	woda czysta	-	1.250.000	-	1.630.000
2	woda-keton metyloetylowy	4,3%	2.640.000	6,8	3.250.000
3	woda-al. butylowy IV rz.	2,9%	2.370.000	4,6	2.780.000
4	woda-alkohol n-propylowy	6,9%	2.100.000	10,0	2.630.000
5	woda-alkohol metylowy	5,5%	1.960.000	8,6	2.270.000

Lp.	Ciśnienie 10 ata		Ciśnienie 15 ata		Ciśnienie 25 ata	
	X_{opt}	q_{krI} kcal/hm ²	X_{opt}	q_{krI} kcal/hm ²	X_{opt}	q_{krI} kcal/hm ²
1	-	2.040.000	-	2.480.000	-	3.240.000
2	8,1	3.740.000	9,9	4.810.000	12,4	6.060.000
3	5,2	3.490.000	6,5	4.130.000	10,1	5.420.000
4	12,6	2.980.000	15,4	3.560.000	20,1	4.610.000
5	10,8	2.580.000	11,9	3.090.000	15,2	3.980.000

z dokładnością do 1% stężenia składnika organicznego, co pozwalało również na wyznaczenie stężenia optymalnego z tą samą dokładnością. Jednak dokładność ta nie mogła być większa, ponieważ w przypadku grzejnika z płaską powierzchnią stalową technika pomiaru jest mniej dokładna niż w przypadku drutu platynowego oporowo grzejnego.

Zestawienie głównych wyników pomiarów dla wrzenia na drucie platynowym podaje tablica 1, a dla wrzenia na płaskiej powierzchni stalowej tablica 2.

Wrzenie na płaskiej powierzchni stalowej

Lp.	Rodzaj składnika organicznego w wodzie	Ciśnienie 1 ata		Ciśnienie 5 ata	
		X_{opt}	q_{krI} kcal/hm ²	X_{opt}	q_{krI} kcal/hm ²
1	woda czysta	-	1.100.000	-	1.510.000
2	woda-keton metyloetylowy	4,0%	2.300.000	7,0	2.660.000
3	woda-alkoh. butylowy IV rz	3,0%	2.200.000	5,0	2.390.000
4	woda-alkohol n-propylowy	7,0%	1.900.000	10,0	2.130.000
5	woda-alkohol metylowy	5,0%	1.450.000	9,0	1.910.000

Lp.	Ciśnienie 10 ata		Ciśnienie 15 ata		Ciśnienie 25 ata	
	X_{opt}	q_{krI} kcal/hm ²	X_{opt}	q_{krI} kcal/hm ²	X_{opt}	q_{krI} kcal/hm ²
1	-	1.820.000	-	2.130.000	-	2.960.000
2	8,0	3.120.000	10,0	4.340.000	12,0	5.420.000
3	5,0	2.880.000	6,0	3.510.000	10,0	4.680.000
4	13,0	2.470.000	15,0	2.960.000	20,0	4.140.000
5	11,0	2.230.000	12,0	2.720.000	15,0	3.590.000

Podane w tabelach wyniki wskazują na związki zachodzące między q_{krI} , ciśnieniem oraz wartościami stężeń optymalnych. Okazuje się, że ze wzrostem ciśnienia rosną wartości q_{krI} zarówno w przypadku drutu platynowego, jak i płaskiej stalowej powierzchni. Ponadto ze wzrostem ciśnienia zwiększają się wartości stężeń optymalnych.

5. Wyniki pomiarów wielkości określających dynamikę wzrostu pęcherzyków

Drugą grupę danych eksperymentalnych stanowią wyniki pomiarów dotyczące warunków wzrostu pęcherzyków. Pomiarami ob-

Jęto zmiany średnic pęcherzyków w czasie do momentu oderwania się od powierzchni grzejnej, tj. $D_x = f(\tau)$ oraz średnice pęcherzyków w momencie oderwania, tj. D_p dla wody z poszczególnymi składnikami organicznymi przy różnych stężeniach.

Pomiary $D_x = f(\tau)$ oraz D_p zostały dokonane zarówno dla wrzenia na drucie platynowym jak i na płaskiej powierzchni stalowej. Badania w.w. wielkości prowadzone były przy ciśnieniach 1 ata, 5 ata, 10 ata, 15 ata i 25 ata równocześnie z pomiarami q i ΔT_x przez naświetlanie za pomocą kamery do szybkich zdjęć taśm filmowych, które były następnie analizowane na ekranie z wyskalowaną podziałką.

Uzyskane wyniki pomiarów wskazują na duże zmiany w przebiegu wielkości charakteryzujących dynamikę wzrostu pęcherzyków pod wpływem rodzaju składnika organicznego, jego stężenia i ciśnienia. Jednocześnie wyniki te wskazują na zachodzące związki z przebiegiem zmian wartości q i ΔT_x w tych samych warunkach. Spostrzeżenia te skłaniają do twierdzenia, że wyjaśnienia zjawiska stężenia optymalnego należy szukać w warunkach najpowolniejszego wzrostu pęcherzyków w tym stężeniu. Ważniejsze wyniki z przeprowadzonych badań dynamiki wzrostu pęcherzyków w stężeniach optymalnych przy wrzeniu na drucie platynowym i na płaskiej powierzchni stalowej podają tablice 3 i 4.

Na podstawie pomiarów okazuje się, że w stężeniach optymalnych wzrost pęcherzyków jest najpowolniejszy oraz średnice pęcherzyków w momencie oderwania od powierzchni grzejnej są najmniejsze, co ma miejsce zarówno przy wrzeniu na drucie platynowym jak i na płaskiej powierzchni stalowej.

Równocześnie w stężeniach optymalnych ma miejsce największa wartość q_{KR1} , przy czym zjawiska te nakładają się we wszystkich przypadkach. Przeprowadzone badania wykazują także, że pod wpływem stężenia i ciśnienia ulega zmianom czas wzrostu pęcherzyka do momentu oderwania od powierzchni grzejnej.

Wrzenie na drucie platynowym

Lp.	Rodzaj składnika organicz.	Ciśnienie 1 ata			Ciśnienie 5 ata				
		Stęż. optym. %	D _p śr mm	τ 1/3000 sek	Stęż. optym. %	D _p śr mm	τ 1/3000 sek		
1	woda czysta	-	4,2	55	-	3,7	48		
2	woda-keton metyloetylowy	4,3	1,4	12	6,8	1,2	10		
3	woda-al-butyl. IV rz.	2,9	2,0	18	4,6	1,8	16		
4	woda-alkohol n-propylowy	6,9	2,2	25	10,0	1,9	22		
5	woda-alkohol metylowy	5,5	2,5	32	8,6	2,2	28		
Lp.	Ciśnienie 10 ata			Ciśnienie 15 ata			Ciśnienie 25 ata		
	Stęż. optym %	D _p śr mm	τ 1/3000 sek	Stęż. optym %	D _p śr mm	τ 1/3000 sek	Stęż. optym %	D _p śr mm	τ 1/3000 sek
1	-	2,8	37	-	2,3	30	-	0,9	12
2	8,1	1,2	8	9,9	0,8	6,0	12,4	0,3	3
3	5,2	1,3	12	6,5	1,1	10	10,1	0,4	4
4	12,6	1,5	17	15,4	1,2	14	20,1	0,5	5
5	10,8	1,7	21	11,9	1,4	18	15,2	0,5	7

Wrzenie na płaskiej powierzchni stalowej

Lp.	Rodzaj składnika organicz.	Ciśnienie 1 ata				Ciśnienie 5 ata			
		Stęż. opt. %	D pśr mm	τ 1/3000 sek	β	Stęż. opt. %	D pśr mm	τ 1/3000 sek	β
1	woda czysta	-	4,5	58	51°	-	3,9	53	49°
2	woda-keton metyloetyl.	4,0	2,0	15	23°	7	1,7	14	22°
3	woda-al. butyl. IV rz.	3,0	2,4	20	28°	5	2,1	18	26°
4	woda-alkoh. n-propylowy	7,0	2,6	28	30°	10	2,3	25	27°
5	woda-al. metylowy	5,0	3,0	39	36°	9	2,6	35	33°

Lp.	Ciśnienie 10 ata				Ciśnienie 15 ata				Ciśnienie 25 ata			
	Stęż. opt. %	D pśr mm	τ 1/3000 sek	β	Stęż. opt. %	D pśr mm	τ 1/3000 sek	β	Stęż. opt. %	D pśr mm	τ 1/3000 sek	β
1	-	3,0	40	48°	-	2,6	32	46°	-	1,0	13	42°
2	-8	1,3	10	20°	10	1,1	8	20°	12	0,4	3	19°
3	5	1,6	14	25°	6	1,4	11	24°	10	0,5	4	22°
4	13	1,7	19	26°	15	1,5	15	27°	20	0,6	6	24°
5	11	2,0	27	30°	12	1,7	22	31°	15	0,7	9	29°

6, Model fizyczny oraz równania uogólnione wymiany ciepła przy pęcherzykowym wrzeniu wody ze składnikiem organicznym

Analizując wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych, można stwierdzić, że optymalne warunki wymiany ciepła przy wrzeniu wody ze składnikiem organicznym wynikają ze zjawiska odrywania się od powierzchni grzejnej najmniejszych pęcherzyków przy stężeniach optymalnych. Wyjaśnienie więc omawianego zjawiska należy szukać w przyczynach najniższego położenia krzywej wzrostu pęcherzyka w czasie, co ma miejsce w stężeniu optymalnym. Określając kolejno równaniami wielkość średnicy pęcherzyka w czasie D_x ze względu na bilans sił ciśnienia, napięcia powierzchniowego, dopływ ciepła i wielkość odparowania oraz dopływ dyfuzyjny składnika bardziej lotnego do powierzchni rozdziału faz i wyliczając następnie z dwóch ostatnich równań wartość temperatury i stężenia na powierzchni rozdziału faz pęcherzyka dla kolejnych wartości ciśnień i stężeń wrzącej mieszaniny oraz dla uzyskanych z pomiaru wartości D_x uzyskano postać równania wynikającego z bilansu sił ciśnienia i napięcia pow. określające średnice pęcherzyków w momencie oderwania od powierzchni grzejnej w zależności od stężenia, podobne do przebiegów eksperymentalnych.

Opierając się na wspomnianych rozważaniach dotyczących fizycznego modelu zjawiska oraz na podstawie przeprowadzonych badań fotograficznych, przyjęto wpływ dyfuzji jako istotny dla przebiegu wzrostu pęcherzyków przy wrzeniu wody ze składnikiem organicznym.

Z tego względu w poszukiwaniu uogólnionej postaci równania wymiany ciepła dla omawianego przypadku wrzenia wody ze składnikiem organicznym do rozważań obok równań różniczkowych ruchu masy w sąsiedztwie pęcherzyka, ruchu cieczy i pary, ciągłości energii oraz równania wymiany ciepła na powierzchni grzejnej o postaci

$$\alpha \Delta T_x = -\lambda_c \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)$$

przyjęto również równanie wymiany masy na granicy pęcherzyka dla składnika bardziej lotnego tj.

$$\delta_{gA} \, dn = - \sigma_A \frac{\partial \pi_A}{\partial n} \, d\tau.$$

Z równań tych, opierając się na zasadzie teorii podobieństwa, uzyskano szereg modułów podobieństwa, wśród których jeden nowy o postaci

$$A = \frac{\delta_{gA} D_p^2}{\sigma_A \Delta \pi_A \tau}.$$

Korzystając następnie z przybliżenia funkcji za pomocą równania wykładniczego Nusselta, pomijając moduły podobieństwa mało istotne dla zjawiska oraz wprowadzając tzw. pęcherzykową liczbę Reynoldsa o postaci $Re_p = \frac{q D_p}{\delta_A \nu_c \delta_c}$ uzyska-

no równanie

$$Nu = c Re_p^{0,81} (Sc.Pr)^{0,42} A^a,$$

gdzie

$$Nu = \frac{\alpha D_p}{\lambda_c}.$$

Wartość stałej C oraz wykładnika a została określona przez naniesienie wyników pomiarów we współrzędnych

$$\lg \frac{Nu}{Re_p^{0,81} (Sc.Pr)^{0,42}} \text{ wzgl. } \lg A.$$

Uzyskano w ten sposób następującą zależność wymiany ciepła dla wrzenia wody z badanymi składnikami organicznymi w zakresie ciśnień 1 - 25 at a oraz dla zakresu stężeń 1 - 22%

$$Nu = C Re_p^{0,81} (Sc.Pr)^{0,42} A^{-2,68},$$

gdzie $C = 85,9 \cdot 10^{-6} \cdot X_c^{-4,6}$,

po podstawieniu

$$Nu = 85,9 \cdot 10^{-6} \cdot X_c^{-4,6} \cdot Re_p^{0,81} \cdot (Sc.Pr)^{0,42} \cdot A^{-2,68},$$

Zakres zmienności liczb podobieństwa wynosi

$$Re_p = 1,25 - 55,1; \quad Sc = 60,6 - 28,3, \quad Pr = 1,61 - 0,82$$

$$A = 402 - 13,2.$$

Równanie to w najniekorzystniejszym przypadku, co ma miejsce przy ciśnieniu 1 ata, daje rozbieżność około 33%. Natomiast przy ciśnieniu 25 ata wielkość błędu nie przekracza 12%.

7. Równania uogólnione określające wartość strumienia cieplnego w warunkach I kryzysu wrzenia

Stwierdzona na podstawie niniejszych badań zależność jaka zachodzi między wielkościami średnic pęcherzyków a wartościami strumieni cieplnych w warunkach I kryzysu wrzenia wskazuje, że w poszukiwaniu uogólnionej zależności określającej wartości strumienia cieplnego w warunkach pierwszego kryzysu wrzenia wody ze składnikiem organicznym zachodzi konieczność oparcia się na tym zjawisku. Przyjmując, że strumień cieplny osiąga wartość odpowiadającą warunkom pierwszego kryzysu wrzenia wówczas, gdy powierzchnia grzejna jest pokryta pęcherzykami, przy czym pęcherzyki stykają się ze sobą oraz zakładając, że odrywające się na powierzchni grzejnej pęcherzyki mają kształt kulisty, można napisać, że ilość ciepła odbierana tylko przez pęcherzyki wyniesie

$$q_p = r_c D_p^3 f \rho_g n \frac{\pi}{6},$$

gdzie f - częstotliwość odrywania się pęcherzyków,

n - ilość czynnych ośrodków wrzenia.

Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że ilość ciepła przejmowana od powierzchni grzejnej przez wrzącą ciecz przy q powyżej 80% q_{krI} jest proporcjonalna do ilości czynnych na tej powierzchni ośrodków wrzenia, co można napisać

$$q \rightarrow n^a.$$

W związku z tym

$$q = C_q r_c \frac{\pi}{6} D_p^3 f \rho_g n^a,$$

gdzie C_q jest współczynnikiem proporcjonalności.

Opierając się na kryterium styczności pęcherzyków, przyjmuje się, że strumień cieplny osiąga wartość q_{krI} wówczas, gdy pęcherzyki pokrywają powierzchnię grzejną. Wobec tego warunkiem osiągnięcia przez strumień cieplny na powierzchni 1 m^2 wartości q_{krI} będzie

$$n = \frac{C_n}{D_p^2} \quad \text{gd}y \quad C_n = 1.$$

Warunek $C_n = 1$ zachodzi wówczas, gdy pęcherzyki dotykają się nawzajem, jednak, jak wykazały badania różnych autorów, moment pierwszego kryzysu wrzenia następuje wcześniej, tzn. przy wartości $C_n < 1$. Wg danych z literatury wartość C_n wynosi około 0,5. Uzyskuje się po podstawieniu wyrażenia

$$n = \frac{C_n}{D_p^2} \quad \text{do równania poprzedniego}$$

$$q_{krI} = C_q C_n' r_c \frac{\pi}{6} f D_p^b \rho_g,$$

gdzie $f = \frac{1}{\tau_{max}}$

po przekształceniu

$$\frac{q_{krI}}{r_c \rho_g \frac{1}{\tau_{max}}} = C D_p^b.$$

Zastępując D_p wyrażeniem $\beta \sqrt{\frac{\sigma_c}{\rho_c - \rho_g}}$ określonym na podstawie danych z pomiarów oraz przeliczeń, przedstawiono na wykresie wyniki pomiarów współrzędnych logarytmicznych

$$\lg \frac{q_{krI}}{r_c \rho_g \frac{1}{\tau_{max}}} \quad \text{wzgl.} \quad \lg \beta \sqrt{\frac{\sigma_c}{\rho_c - \rho_g}}$$

Pozwala to uzyskać na podstawie wyników pomiarów ogólną zależność dla wrzenia wody z badanymi składnikami organicznymi

$$q_{krI} = 62,2 \cdot r_c \cdot \rho_g \cdot \frac{1}{\tau_{max}} \cdot 10^6 \left(\beta \sqrt{\frac{\sigma_c}{\rho_c - \rho_g}} \right)^{-4,2}$$

Powyższa zależność spełnia wszystkie wyniki pomiarów z dokładnością do 24,6% dla zakresu ciśnień 1 - 25 ata i stężeń 1° - 22%.

8. Wnioski końcowe

Uzyskane wyniki dotyczą wymiany ciepła przy wrzeniu pęcherzykowym wody ze składnikiem organicznym w warunkach konwekcji swobodnej. Badania zostały przeprowadzone przy różnych ciśnieniach w zakresie 1 - 25 ata zarówno na drucie platynowym jak i na płaskiej powierzchni stalowej, gdyż ta ostatnia jest powierzchnią typową w urządzeniach technicznych.

Wyniki przeprowadzonych badań w ramach niniejszej pracy pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Pod wpływem składnika organicznego przy pęcherzykowym wrzeniu wody w warunkach konwekcji swobodnej następuje zmiana warunków wymiany ciepła, w wyniku czego przy pewnych stężeniach ma miejsce wzrost wartości strumienia cieplnego w warunkach pierwszego kryzysu wrzenia.

2. Zjawisko wzrostu krytycznego strumienia cieplnego pod wpływem składnika organicznego w zakresie ciśnień 1 - 25 ata zachodzi nie tylko przy wrzeniu na drucie platynowym, lecz również przy wrzeniu na płaskiej powierzchni stalowej.

3. Pod wpływem wzrostu ciśnienia następuje we wszystkich przypadkach nieznaczny wzrost wartości stężenia optymalnego.

4. W zakresie ciśnień 1 - 25 ata w stężeniach optymalnych wartości q_{krI} osiągają wartości maksymalne, natomiast średnice pęcherzyków w momencie oderwania od powierzchni grzejnej są najmniejsze.

5. Pod wpływem składnika organicznego, jego stężenia oraz ciśnienia, przy którym przebiega wrzenie, następują zmiany w czasie wzrostu pęcherzyka do momentu oderwania od powierzchni grzejnej, przy czym w stężeniu optymalnym czas wzrostu pęcherzyków do momentu oderwania od powierzchni grzejnej jest najkrótszy.

6. We wszystkich przypadkach pomiarów stwierdzono, że im szybciej rośnie pęcherzyk w początkowej fazie, tym większą osiąga wielkość w momencie oderwania od powierzchni grzejnej.

7. Wyniki pomiarów wskazują na istnienie związku między q_{krI} a D_p dla przebadanych składników organicznych. Dla wszystkich przypadków mniejszym wartościom D_p odpowiadają większe wartości q_{krI} (przy ciśnieniach 1 - 25 ata).

8. Strumień cieplny w warunkach pierwszego kryzysu wrzenia na drucie platynowym ma we wszystkich przypadkach większą wartość niż ma to miejsce przy tym samym stężeniu i ciśnieniu na płaskiej powierzchni stalowej.

9. Niewielkie różnice w stężeniach optymalnych przy wrzeniu na drucie platynowym oraz na płaskiej powierzchni stalowej wskazują, że wielkość stężenia optymalnego zależy nieznacznie od rodzaju powierzchni i jej kształtu, lecz głównie od właściwości fizycznych składnika organicznego ciśnienia i temperatury.

10. W obszarze stężeń bliskich stężenia optymalnego wielkość przegrzań w zależności od zmian stężenia zmienia się nieznacznie. Duże są natomiast różnice w wartości q_{krI} .

11. Wielkość przegrzań w przypadku płaskiej powierzchni stalowej jest mniejsza niż w przypadku drutu platynowego.

Bibliografia

1. Rybka W.: Arch.Bud.Maszyn Tom X, Zeszyt 1
2. Bonilla C.F., Eisenberg A.A.: Ind.Eng.Chem. 40, 1113 - 1122,
3. Kirschbaum E.: Angew.Chem. 1948 (20B)
4. Cichelli M.T., Bonilla C.F.: Trans.Amer.Inst.Chem.Eng. 1954 (41).
5. Bonilla C.F., Perry C.W.: Trans.Amer.Inst.Chem.Eng.1951, 36, 685-705.

6. Vos A.S., van Strahlen S.J.D: Chem.Eng.Sci.1956 (5).
7. Hovestraidt J.: Chem.Eng. Sci 1963 vol.18 p.631.
8. Richardson J.F.: Chem.Eng. Sci 1959 vol.10 p.234.
9. Pang Sheng Li: A.J.Ch.E. Journal July 1965 p.581.
10. Grigorjew L.N.: Tiepło i masopierenos tom II Izd.Akad. Nauk B.S.S.R. Mińsk 1962.
11. Usmanow A.G.: Trudy K.Ch.T.J. Ser. Chim. Nauk wyp.26,32, 1959.
12. Journal of Heat, 1962, 1965, 1966, 1967.