



95 років Національній академії наук України

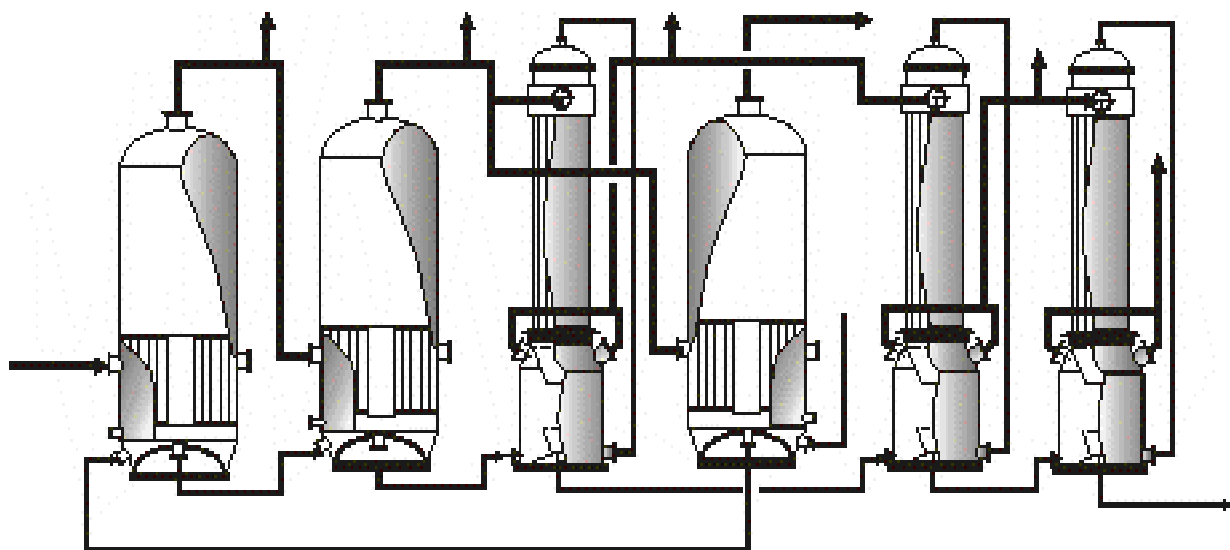
ТЕПЛООБМІН В ПРОЦЕСАХ КИПІННЯ ГУСТИХ ЦУКРОВИХ РОЗЧИНІВ В НИЗХІДНИХ КІЛЬЦЕВИХ ПОТОКАХ



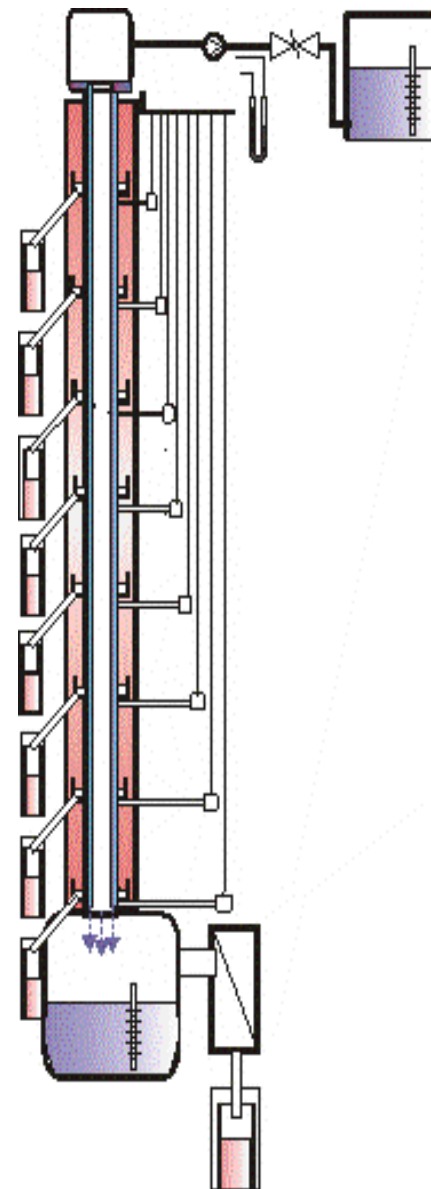
**Національний університет харчових
технологій**

В.П. Петренко, О.М. Рябчук

**ВИПАРНА УСТАНОВКА ЦУКР. 3-ДУ
З ПЛІВКОВИМИ ВИПАРНИМИ
АПАРАТАМИ НА ХВОСТОВІЙ
ЧАСТИНІ ВУ**



*Типова експериментальна
установка для моделювання
плівкових течій в трубах випарних
апаратів*



Концентрування соків у режимі гравітаційно-стікаючої плівки дозволяє суттєво зменшити час перебування розчину в апараті, забезпечує високу інтенсивність тепловіддачі в процесі концентрування густих високов'язких розчинів, позбавитись гідростатичної температурної депресії, яка є досить значною в області розрідження.

Незважаючи на велике число робіт по теплообміну в гравітаційно-стікаючих плівках, лише незначна їх кількість присвячена процесам кипіння густих високов'язких розчинів, до того ж, переважно, під атмосферним тиском. Крім того, генерування двофазових низхідних кільцевих потоків здійснювалося на установках, що моделюють реальний випарний апарат, де неможливо відокремити ряд впливових на теплообмін та гідродинаміку факторів, тому рекомендовані на основі експериментальних досліджень співвідношення не мають універсальної дії і обмежені конфігурацією модельної установки.

Область режимних параметрів, яка викликає найбільший інтерес, а саме теплообмін при кипінні густих концентрованих плівок під розрідженням, залишається недостатньо дослідженою і потребує додаткового опрацювання. Саме за таких умов експлуатуються випарні апарати останніх корпусів випарної станції цукрового заводу і саме для цієї області відсутні надійні рівняння для розрахунку інтенсивності тепловіддачі в режимах випаровування з вільної поверхні та кипіння. У зв'язку з цим експериментальне дослідження теплогідродинамічних процесів в густих плівках в області розрідження є актуальним і має велике практичне значення.

Мета

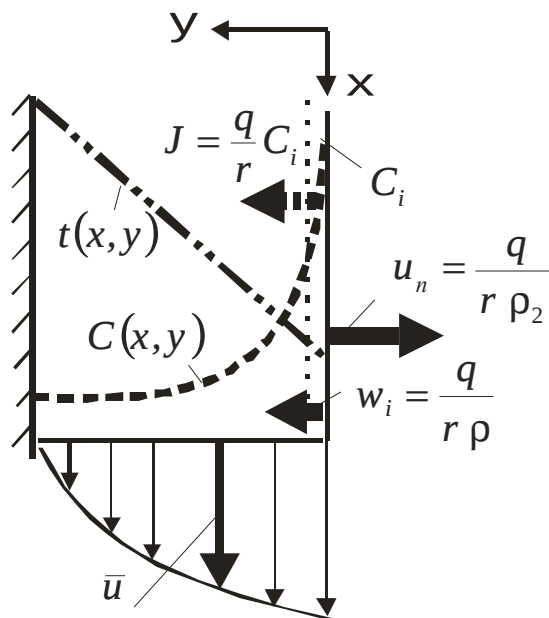
Розроблення науково обґрунтованого комплексу аналітичних та емпіричних рівнянь для моделювання теплогідродинамічних процесів, що протікають при пароутворенні в низхідних кільцевих парорідинних течіях густих цукрових розчинів

Задачі

- **Виконати** аналітичні та експериментальні дослідження теплогідродинамічних процесів, що протікають при пароутворенні в низхідних плівках цукрових розчинів в умовах, характерних для роботи плівкових випарних апаратів.
- **Виявити** вплив окремих факторів на інтенсивність тепловіддачі при кипінні в плівках низхідних кільцевих парорідинних потоків густих цукрових розчинів в області незначного надлишкового тиску та розрідженні.
- **Отримати** на основі аналітичних та експериментальних досліджень розрахункові залежності для визначення коефіцієнтів тепловіддачі в широкому діапазоні зміни витрат фаз та режимних параметрів, а також коефіцієнтів міжфазного гідравлічного тертя.

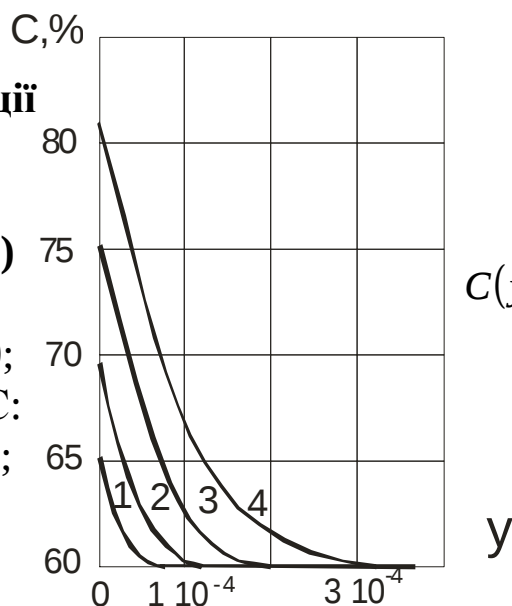
Особливості теплогідродинамічних процесів при концентруванні густих розчинів

Схема потоків та профілю концентрації в плівці



Розподіл концентрації в плівці на різних відстані від входу, розрахованої за (11)

$\delta = 3,75 \cdot 10^{-4} \text{ м};$
 $u = 0,111 \text{ м/с}; \text{Re} = 40;$
 $q = 6 \text{ кВт/м}^2; t = 80 \text{ }^\circ\text{C};$
 1 – $x = 0,1 \text{ м};$ 2 – $0,5;$
 3 – $0,8;$ 4 – $1,5.$



Граничні умови на міжфазній поверхні

$$D \frac{\partial C(0,x)}{\partial y} = -\frac{q}{r\rho} C(0,x)$$

$$D \frac{\partial C(0,x)}{\partial y} = -\frac{q(0,x)}{r\rho} C(0,x) \approx -\frac{j}{\rho} = \text{const}$$

Рівняння конвективної дифузії

$$u_x \frac{\partial C(x,y)}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C(x,y)}{\partial y^2}$$

Швидкість плівки

$$u_x = \frac{\rho g \delta}{\mu} y - \frac{\rho g}{2\mu} y^2 \quad \Rightarrow \quad u_x = \bar{u} = \frac{\rho g \delta^2}{3\mu}$$

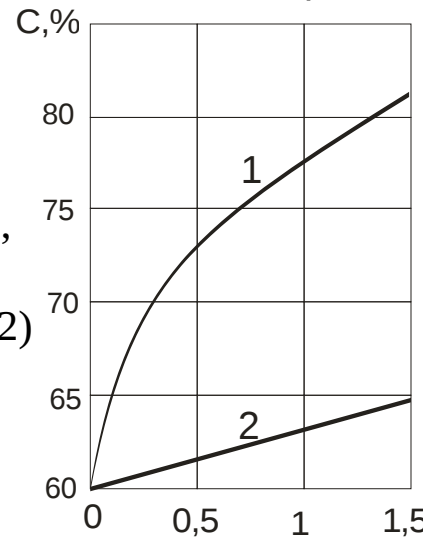
Розподіл концентрації в плівці

$$C(y,x) = C_o + \frac{2J}{\rho D} \sqrt{\frac{Dx}{\bar{u}}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{y^2 \bar{u}}{4Dx}\right) - \frac{y}{2\sqrt{\frac{Dx}{\bar{u}}}} \operatorname{erfc}\left(\frac{y}{2\sqrt{\frac{Dx}{\bar{u}}}}\right) \right\}$$

Особливості теплогідродинамічних процесів при концентруванні густих розчинів

Середня концентрація
$$C_{cp}(x) = C_o + \frac{Jx}{\rho \bar{u} \delta} \operatorname{erf}\left(\frac{\delta}{2} \sqrt{\frac{\bar{u}}{Dx}}\right) - \frac{J\delta}{2D\rho} \operatorname{erfc}\left(\frac{\delta}{2} \sqrt{\frac{\bar{u}}{Dx}}\right) + \frac{Jx}{\rho \bar{u} \sqrt{\pi} \sqrt{\frac{Dx}{\bar{u}}}} \exp\left(-\frac{\delta^2 \bar{u}}{4xD}\right)$$

Зміна концентрації в плівці по довжині поверхні теплообміну:
 1 – на міжфазній границі, формула (13);
 2 – середньої, формула (12)
 $q = 6 \text{ кВт/м}^2$;
 $\Gamma_v = 0,415 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$;
 початкова концентрація $C_0 = 60\%$.



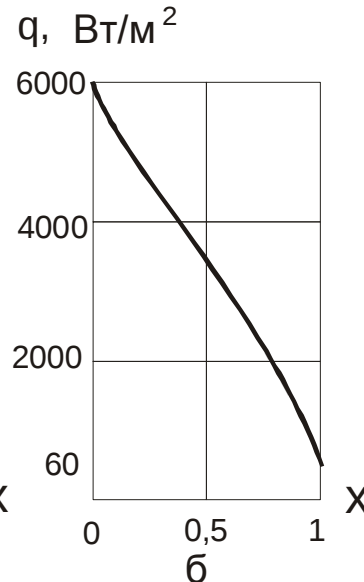
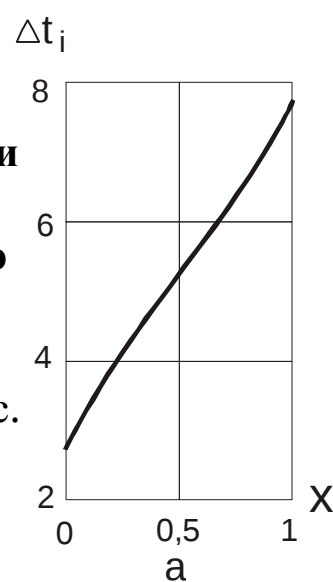
Концентрація на міжфазній поверхні

$$C_i(x) = C(0, x) = C_o + \frac{2J}{\rho D \sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{Dx}{\bar{u}}}$$

Фізико-хімічна температурна депресія для цукрових розчинів

$$\Delta t_i(x) = 0,01622 \frac{T^2}{r} \frac{C_i(x)100}{0,62655 - 0,695C_i(x)100}$$

Графіки залежності підвищення температури кипіння на міжфазній границі (а) та теплового потоку (б) від довжини теплообмінного каналу
 $Re = 40$; $\Gamma_v = 0,415 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$;
 $t_s = 80 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{cm} = 88,3 \text{ }^\circ\text{C}$;
 $\delta = 3,75 \cdot 10^{-4} \text{ м}$



Зміна теплового потоку вздовж поверхні теплообміну

$$q(x) = \frac{\lambda}{\delta} (t_{cm} - t_s - \Delta t_i(x))$$

Особливості теплогідродинамічних процесів при концентруванні густих розчинів

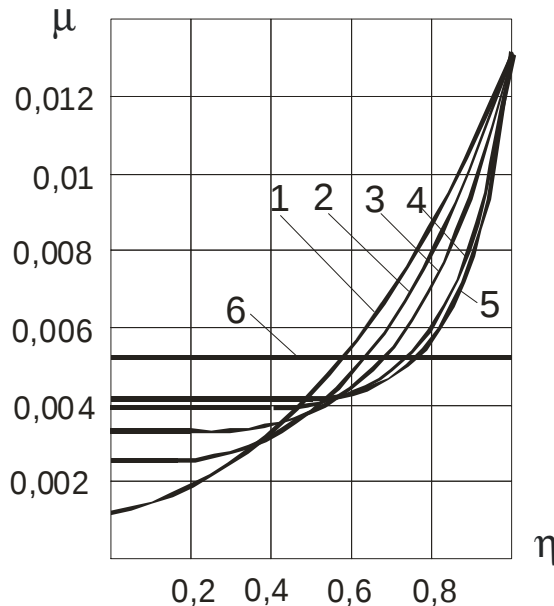
Апроксимація для розрахунку в'язкості

$$\mu = \mu_o + A\eta^n$$

$$A = \mu_i - \mu_o; \quad B = \frac{m_i}{\bar{m}}; \quad A = B\bar{m} - m_o; \quad \bar{\mu} = \int_0^1 [\mu_o + (B\bar{\mu} - \mu_o)\eta^n] d\eta = \mu_o + \frac{B\bar{\mu} - \mu_o}{n+1}$$

В'язкість на стінці $m_o = \bar{m} \left(\frac{n+1}{n} - \frac{B}{n} \right)$

$$\mu = \mu_o + A\eta^n \quad \Rightarrow \quad \mu = \bar{\mu} \left(\frac{n+1}{n} - \frac{B}{n} \right) + \bar{\mu} \left(\frac{n+1}{n} B - \frac{n+1}{n} \right) \eta^n$$



Профілі в'язкості за співвідношенням при $B = 2,5$:

1 – $n = 2$; 2 – 3; 3 – 4;
5 – 8; 6 – $\mu = \text{const}$

Рівняння руху для усталеної плівки

$$\delta^2 \rho g (1 - \eta) = \bar{\mu} (B_1 + B_2 \eta^n) \frac{du}{d\eta}$$

$$B_1 = \frac{n+1}{n} - \frac{B}{n}; \quad B_2 = \frac{n+1}{n} (B - 1)$$

Профілі швидкості

А) $n = 2$
$$u = \frac{\delta^2 \rho g}{B_2 \bar{\mu}} \left\langle \frac{1}{b} \arctg \frac{\eta}{b} - \frac{1}{2} \ln(b^2 + \eta^2) + \frac{1}{2} \ln b^2 \right\rangle$$

Б) $n = 3$
$$u = \frac{\delta^2 \rho g}{B_2 \bar{\mu}} \left\langle \frac{1}{6b^2} \ln \frac{(b+\eta)^2}{b^2 - b\eta + \eta^2} + \left(\frac{1}{b^2 \sqrt{3}} - \frac{1}{b \sqrt{3}} \right) \arctg \frac{2\eta - b}{b \sqrt{3}} - \right. \\ \left. - \frac{1}{6b} \ln \frac{b^2 - b\eta + \eta^2}{(b+\eta)^2} + \left(\frac{1}{b \sqrt{3}} - \frac{1}{b^2 \sqrt{3}} \right) \arctg \frac{-1}{\sqrt{3}} \right\rangle$$

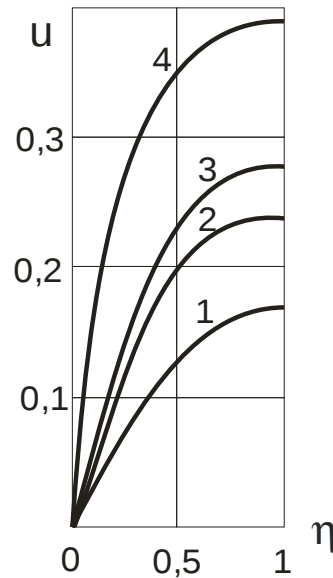
В) $n = 4$

$$b = \sqrt{\frac{B_1}{B_2}} \quad u = \frac{\delta^2 \rho g}{\bar{\mu} B_2} \left\langle \frac{1}{4b^3 \sqrt{2}} \ln \frac{\eta^2 + \eta b \sqrt{2} + b^2}{\eta^2 - \eta b \sqrt{2} + b^2} + \frac{1}{2\sqrt{2}b^3} \arctg \left(\frac{\eta \sqrt{2}}{b} + 1 \right) + \right. \\ \left. + \frac{1}{2\sqrt{2}b^3} \arctg \left(\frac{\eta \sqrt{2}}{b} - 1 \right) - \frac{1}{2b^2} \arctg \frac{\eta^2}{b^2} \right\rangle$$

Особливості теплогідродинамічних процесів при концентруванні густих розчинів

Середня товщина плівки

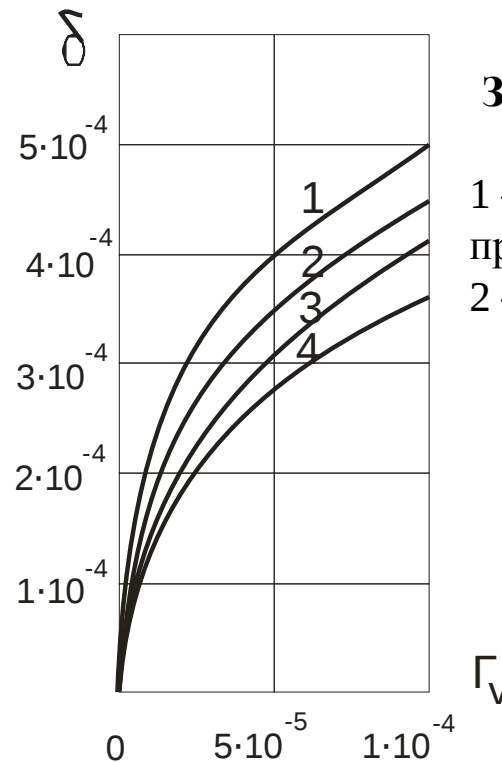
$$\delta = \frac{\Gamma_v}{\bar{u}} = \frac{\Gamma_v}{\int_0^1 u d\eta}$$



Профілі швидкості в плівці

при $Re = 40$, $B = 2,5$:

- 1 – $\mu = \bar{m} = \text{const}$, параболический профіль швидкості;
- 2 – $n = 4$, розрахунок за рівнянням;
- 3 – $n = 3$, (20); 4 – $n = 2$



Залежність товщини плівки від щільності зрошення:

- 1 – $\mu = \bar{m} = \text{const}$, параболический профіль швидкості;
- 2 – $n = 4$, 3 – $n = 3$; 4 – $n = 2$

Експериментальна установка

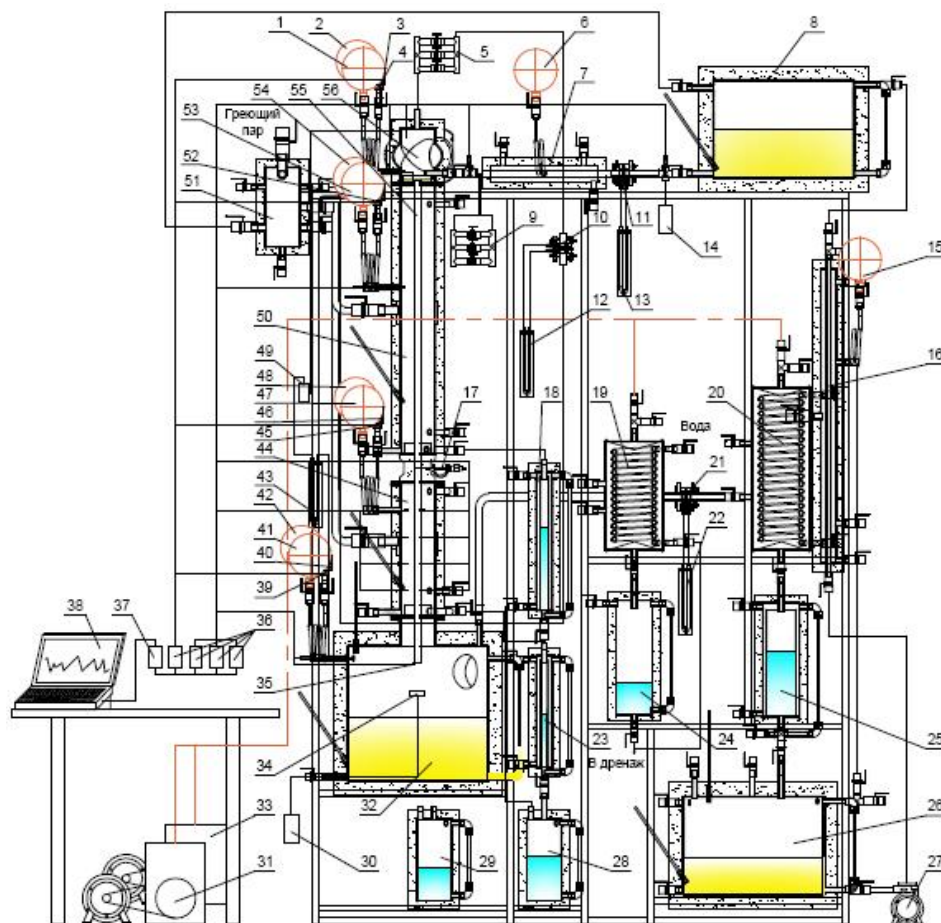


Схема експериментальної установки

1, 6, 15, 41, 47, 53 – манометри; 2, 42, 48, 54 – вакуумметри; 3, 39, 45 – датчики розрідження; 4, 40, 46, 52 – датчики тиску; 5, 9 – гребінки регулювання витрати; 7, 16 – теплообмінники; 8, 26, 32 – баки; 10, 11, 21 – діафрагми; 12, 13, 22, 43 – дифманометри; 14, 30 – пробовідбірники; 17 – давач для вимірювання товщини плівки; 18, 23, 24, 25, 28, 29 – збірники конденсату; 19, 20 – конденсатори; 27 – насос; 31, 33 – вакуум-насоси; 34 – ємність для відбору проб; 35 – ємність для визначення температури соку на виході з труби; 36 – модуль аналогового вводу 7018P; 37 – модуль 7520; 38 – комп'ютер; 44, 50 – гріючі камери; 49 – урівноважуюча ємність; 51 – сепаратор гріючої пари; 55 – експериментальна труба; 56 – верхня камера.



Фото експериментальної установки

Діапазон дослідження

Об'ємна щільність зрошення – $(0,4...5,5) \cdot 10^{-4}$ м²/с; розрідження – 0...0,084 МПа;
температурний напір – 2...20 °С; концентрація – 0 ... 72%; швидкість вторинної
пари – 0,5 ... 45 м/с; кінематична в'язкість – $(0,28...30) \cdot 10^{-6}$ м²/с, Pr 1,7 ... 290.

Обробка експериментальних даних

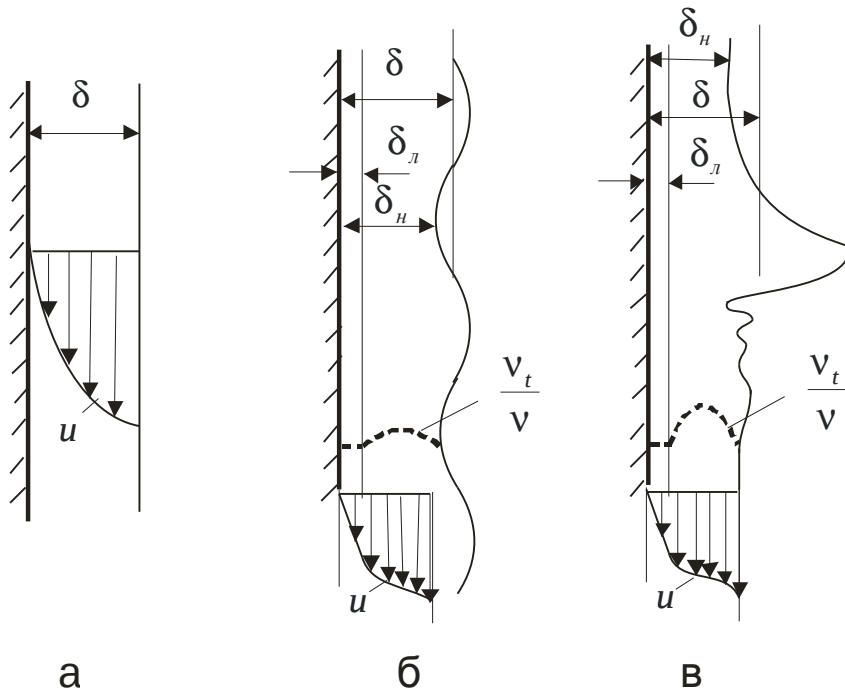
Fragment of the experimental data database showing various parameters such as temperature, pressure, and flow rate across multiple rows of data.

Фрагмент бази даних проведеного експерименту

Fragment of the experimental data database showing various parameters such as temperature, pressure, and flow rate across multiple rows of data.

Фрагмент бази даних отриманих результатів

Кореляції по теплообміну при випаровуванні з поверхні плівок



Структурні форми плівкової течії по вертикальній поверхні:

а – структура плівки з гладкою міжфазною поверхнею

б - поверхнею вкритою капілярними синусоподібними хвилями

в - поверхнею вкритою хвилями збурення двомірної або тримірної структури

Розподіл турбулентної в'язкості в межах турбулентного шару при

$$\frac{7,8}{\delta^+} \leq \eta \leq 1$$

$$\frac{v_t}{v} = 0,39(\eta\delta^+ - \delta_o^+)(1 - \eta) \quad \Rightarrow \quad \frac{v_t}{v} = \varepsilon_m(\eta\delta_n^+ - \delta_l^+)(1 - \eta)$$

$$\eta = \frac{y}{\delta_n} \quad \eta_l = \frac{\delta_l}{\delta_n} = \frac{\delta_l^+}{\delta_n^+} \quad \delta_l^+ = \frac{\delta_l u^*}{v} = 7,8 \quad \delta_n^+ = \frac{\delta_n u^*}{v} \quad u^* = \sqrt{\frac{\tau_i + \rho g \delta_n}{\rho}} \quad \delta_l = \frac{7,8 v}{u^*}$$

Кореляції по теплообміну при випаровуванні з поверхні плівок

Профіль температури в ламінарному шару

$$t(\eta) = t_{cm} - \frac{q\delta_H}{\lambda}\eta$$

Температура на границі ламінарного шару

$$t_L = t_{cm} - \frac{q\eta_L\delta_H}{\lambda}$$

Профіль температури в турбулентному ядрі

$$t = t_L - \int_{\eta_L}^{\eta} \frac{q\delta_H}{\lambda} \frac{d\eta}{1 + \frac{Pr}{Pr_t} \epsilon_m (\eta\delta_H^+ - \delta_L^+) (1-\eta)} = t_L - \frac{2q\delta_H}{\lambda R_m} \left[\arctg\left(\frac{Pr}{Pr_t} \epsilon_m \frac{2\delta_H^+(\eta-1) - \delta_L^+}{R_m}\right) - \arctg\left(\frac{Pr}{Pr_t} \epsilon_m \frac{2\delta_H^+(\eta_L-1) - \delta_L^+}{R_m}\right) \right]$$

$$R_m = \sqrt{\left(\frac{Pr}{Pr_t}\right)^2 \epsilon_m^2 (2\delta_L^+\delta_H^+ - \delta_L^{+2} - \delta_H^{+2}) - 4\left(\frac{Pr}{Pr_t}\right) \epsilon_m \delta_H^+}$$

Різниця температур між ламінарним шаром та міжфазною поверхнею

$$t_L - t_i = - \int_{\eta_L}^1 \frac{q\delta_H}{\lambda} \frac{d\eta}{1 + \frac{Pr}{Pr_t} \epsilon_m (\eta\delta_H^+ - \delta_L^+) (1-\eta)} = - \frac{2q\delta_H}{\lambda R_m} \left[\arctg\left(\frac{Pr}{Pr_t} \epsilon_m \frac{\delta_H^+ - \delta_L^+}{R_m}\right) - \arctg\left(\frac{Pr}{Pr_t} \epsilon_m \frac{2\delta_H^+(\eta_L-1) - \delta_L^+}{R_m}\right) \right]$$

Різниця температур між стінкою та міжфазною поверхнею

$$t_{cm} - t_i = \frac{q\eta_L\delta_H}{\lambda} + \frac{2q\delta_H}{\lambda R_m} \left[\arctg\left(\frac{Pr}{Pr_t} \epsilon_m \frac{\delta_H^+ - \delta_L^+}{R_m}\right) - \arctg\left(\frac{Pr}{Pr_t} \epsilon_m \frac{\delta_H^+(2\eta_L-1) - \delta_L^+}{R_m}\right) \right]$$

Кореляції по теплообміну при випаровуванні з поверхні плівок

Коефіцієнт тепловіддачі, віднесений до різниці температур між стінкою та міжфазною поверхнею

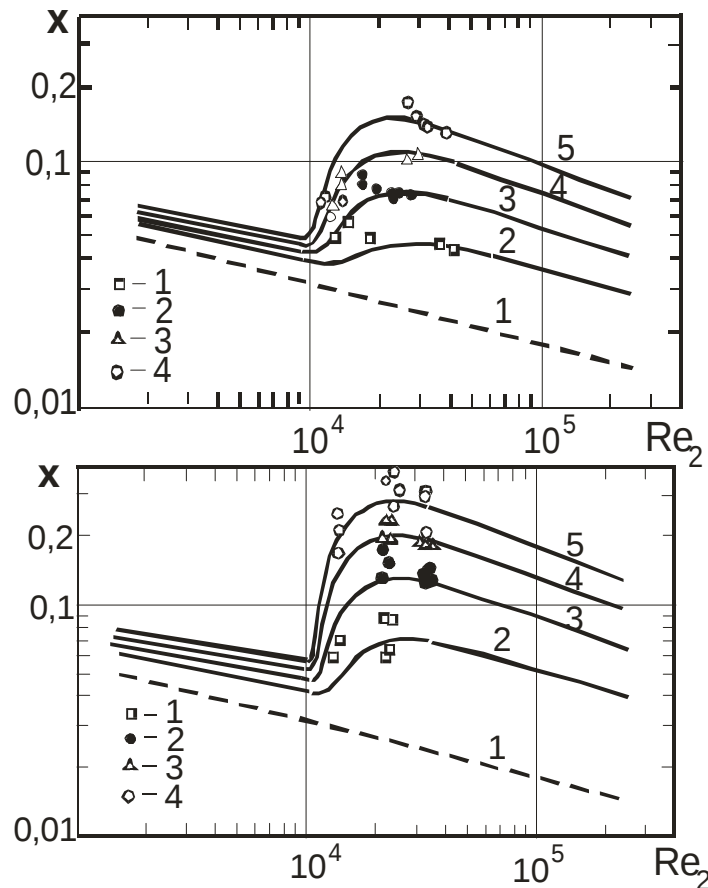
$$\alpha = \frac{q}{t_{cm} - t_i} = \left(\frac{\lambda}{\delta_n} \right) \left\{ \frac{R_m}{\eta_l R_m - 2 \left[\arctg \left(\frac{Pr}{Pr_t} \varepsilon_m \frac{\delta_n^+ - \delta_l^+}{R_m} \right) - \arctg \left(\frac{Pr}{Pr_t} \varepsilon_m \frac{\delta_n^+ (2\eta_l - 1) - \delta_l^+}{R_m} \right) \right]} \right\}$$

або у безрозмірному вигляді

$$Nu = \frac{\alpha \delta_n}{\lambda} = \left\{ \frac{R_m}{\eta_l R_m - 2 \left[\arctg \left(\frac{Pr}{Pr_t} \varepsilon_m \frac{\delta_n^+ - \delta_l^+}{R_m} \right) - \arctg \left(\frac{Pr}{Pr_t} \varepsilon_m \frac{\delta_n^+ (2\eta_l - 1) - \delta_l^+}{R_m} \right) \right]} \right\}$$

$$R_m = \sqrt{\left(\frac{Pr}{Pr_t} \right)^2 \varepsilon_m^2 (2\delta_l^+ \delta_n^+ - \delta_l^{+2} - \delta_n^{+2}) - 4 \left(\frac{Pr}{Pr_t} \right) \varepsilon_m \delta_n^+}$$

Коефіцієнт міжфазного тертя



Залежність $\xi = f(Re_2)$ для паро-водяного потоку при $d = 0,02$ м; $L = 1,8$ м:

точки: 1 – $\Gamma_v = 0,05 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$; 2 – $0,15 \cdot 10^{-3}$; 3 – $0,3 \cdot 10^{-3}$; 4 – $0,5 \cdot 10^{-3}$; лінії відповідають розрахунку за рівнянням за витрат: 2 – $\Gamma_v = 0,05 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$; 3 – $0,15 \cdot 10^{-3}$; 4 – $0,3 \cdot 10^{-3}$; 5 – $0,5 \cdot 10^{-3}$. Лінія 1 відповідає руху на суху стінку.

Залежність $\xi = f(Re_2)$ для паро-сиропного потоку з концентрацією 70% при $d = 0,02$ м; $L = 1,8$ м:

точки: 1 – $\Gamma_v = 0,05 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$; 2 – $0,15 \cdot 10^{-3}$; 3 – $0,3 \cdot 10^{-3}$; 4 – $0,5 \cdot 10^{-3}$; лінії відповідають розрахунку за рівнянням за витрат: 2 – $\Gamma_v = 0,05 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$; 3 – $0,15 \cdot 10^{-3}$; 4 – $0,3 \cdot 10^{-3}$; 5 – $0,5 \cdot 10^{-3}$. Лінія 1 відповідає руху на суху стінку.

Узагальнююче співвідношення

$$\xi_1 = \xi_c + 3 \cdot 10^{-3} + 4 \cdot 10^{-2} K_\delta$$

$$K_\delta = \sqrt[6]{\frac{\Gamma_v^3 v}{g^2}} \sqrt{\frac{g \rho}{\sigma}} \quad \xi_c = \frac{0,316}{Re_2^{0,25}}$$

$$H = \sqrt{\frac{\rho \sigma}{g d^2 \rho_2^2}} \quad Fr_2 = \frac{u_2^2}{g d} \quad d_o = 0,013 \text{ м}$$

$$\xi = \xi_1 + \frac{627 \left(\frac{d_o}{d} \right)}{Fr_2^{1,26} \left\{ \exp \left[\frac{1}{\left(Fr_2 - H^{1,1} \sqrt{\frac{d}{d_o}} \right) \cdot 1,25 \cdot 10^{-2} K_\delta^{1,5}} \right] - 1 \right\}}$$

Співвідношення для розрахунку
коефіцієнта міжфазного тертя для плівкових течій

$\frac{d}{L}$	Режим руху	Розрахункове рівняння	Джерело
$\frac{25}{2000}$	2	$\xi = 0,18 \cdot 10^{-9} Re_2^{1,35} Re^{0,93}$	[43]
	3	$\xi = 0,893 Re_2^{-0,492} Re^{0,49}$	
$\frac{50}{3200}$	2	$\xi = 0,68 \cdot 10^{-7} Re_2^{0,582} Re^{0,705}$	[44]
	3	$\xi = 0,3 Re_2^{-0,468} Re^{0,517}$	
$\frac{34}{2600}$	1	$\xi = \xi_c \left[1 + 0,75 Re_2^{-0,51} \left(\frac{g\delta}{v} \right)^{0,505} \left(\frac{\sigma}{\rho_2 g \delta^2} \right)^{0,08} \right]$	[42]
	3	$\xi = \xi_c \left[1 + 956 Ga^{-0,705} We^{-0,32} \left(\frac{Re}{4} \right)^{0,75} \left[1 + 533 \left(\frac{L}{d} \right)^{-2,5} \right] \right]$	
$\frac{28}{3000}$	2 - 3	$\frac{1}{\sqrt{\xi}} = 1,74 - 0,87 \ln \left(\frac{2\Delta_{ек}^*}{d} + \frac{186}{Re_2 \sqrt{\xi}} \right)$ $\Delta_{ек}^* = 7 \cdot 10^3 \frac{\tau_i^*}{\tau_i^{*2,8} + 15} Re^4 We_*^{-3,8}$	[17]

$$We = \frac{u_2^2 \rho d}{\sigma}$$

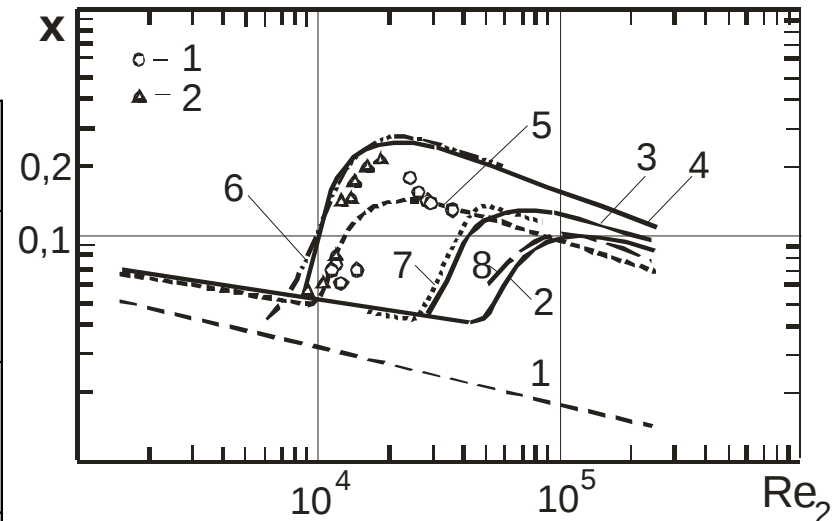
$$Re = \frac{4 \Gamma_v}{v}$$

$$We_* = \frac{\sigma}{\rho \left(\frac{v^2}{g} \right)^{2/3}}$$

$$Ga = \frac{\sigma^{3/2}}{\rho^{3/2} g^{1/2} v^2}$$

$$\tau_i = \frac{\xi}{8} \rho_2 u_2^2$$

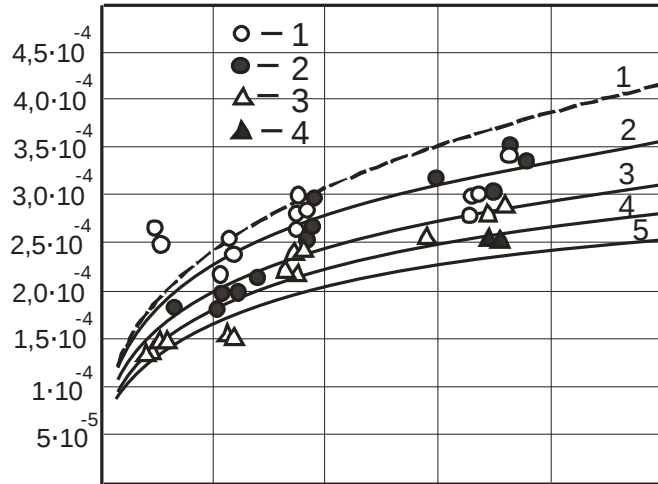
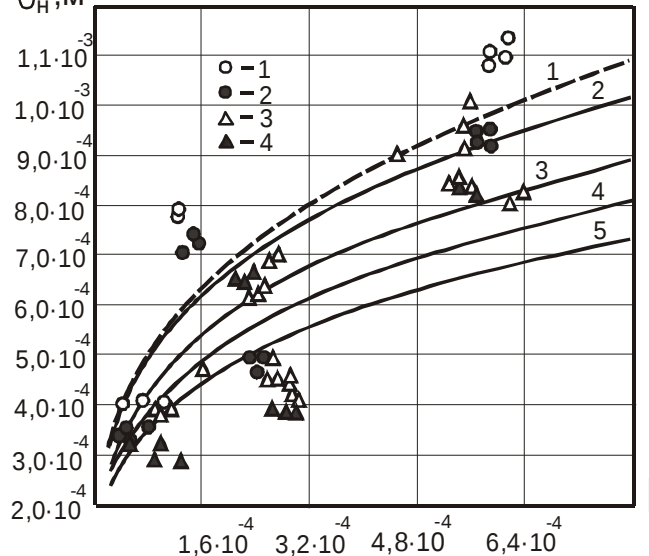
$$\tau_i^* = \frac{\tau_i}{\rho g \left(\frac{v^2}{g} \right)^{1/3}}$$



Залежність $\xi = f(Re_2)$ при $\Gamma_v = 0,5 \cdot 10^{-3} \frac{m^2}{c}$

1 – експериментальні дані, $d = 0,02$ м, $L = 1,8$ м пара-вода, $t = 100$ °С;
2 – дані [90], $\Gamma_v = 0,45 \cdot 10^{-3} m^2/c$, $t = 20$ °С, $d = 0,013$, $L = 0,88$ м повітря-вода;
лінія 1 відповідає опору на суху стінку;
лінії 2, 3, 4 відповідають розрахунку за формулою для повітря-водяного потоку для труб діаметрами відповідно 50, 34, 13 мм;
лінія 5 відповідає розрахунку за формулою для паро-водяного потоку для труби діаметром 20 мм;
лінії 6, 7, 8 відповідають узагальненим даним [89, 42, 44] для повітря-водяного потоку для труб діаметрами відповідно 13, 34, 50 мм

Товщина неперервного шару плівки

 $\delta_n, \text{м}$

 $\delta_n, \text{м}$


Порівняння експериментальних та розрахункових даних з товщини неперервної частини плівки води при $t=100\text{ }^{\circ}\text{C}$:

точки: 1 - $u_2 = (2 \dots 4) \text{ м/с}$; 2 - $(13 \dots 17)$;

3 - $(20 \dots 24)$; 4 - 28;

лінії: 1 – товщина ламінарної плівки $\delta_n = \sqrt[3]{\frac{3\Gamma_v v}{g}}$

2 – товщина неперервного шару за співвідношенням при $u_2 = 15 \text{ м/с}$; 3 – 20;

4 – 25; 5 – 35.

Порівняння експериментальних та розрахункових даних з товщини неперервної частини плівки сиропу, концентрацією 70% при $t=100\text{ }^{\circ}\text{C}$:

точки: 1 - $u_2 = (2 \dots 4) \text{ м/с}$; 2 - $(13 \dots 17)$;

3 - $(20 \dots 24)$; 4 - 28;

лінії: 1 – товщина ламінарної плівки $\delta_n = \sqrt[3]{\frac{3\Gamma_v v}{g}}$

2 – товщина неперервного шару за співвідношенням при $u_2 = 15 \text{ м/с}$; 3 – 20;

4 – 25; 5 – 35.

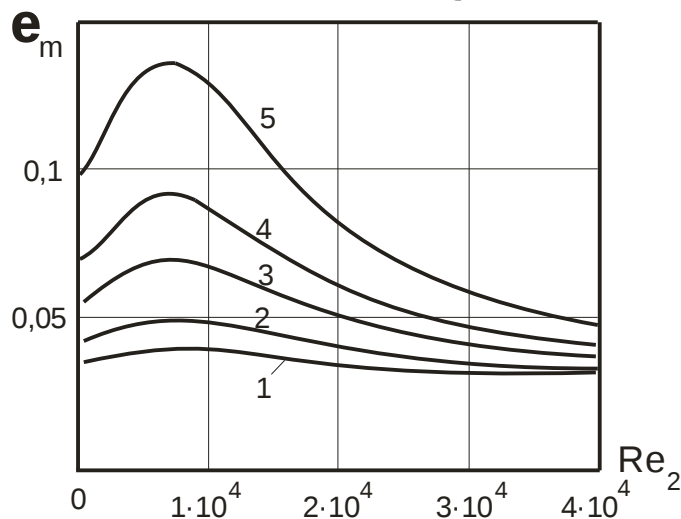
Результуюче узагальнююче співвідношення

$$\delta_n = \left[\left(\frac{3\Gamma_v v}{g} \right)^{1/3} - 0,9 \cdot 10^{-8} Re^{0,95} \right] \left[\exp(-10^{-5} Re_2) \right]$$

Результати математичного моделювання процесів теплообміну при випаровуванні з поверхні насичених плівок розчинів

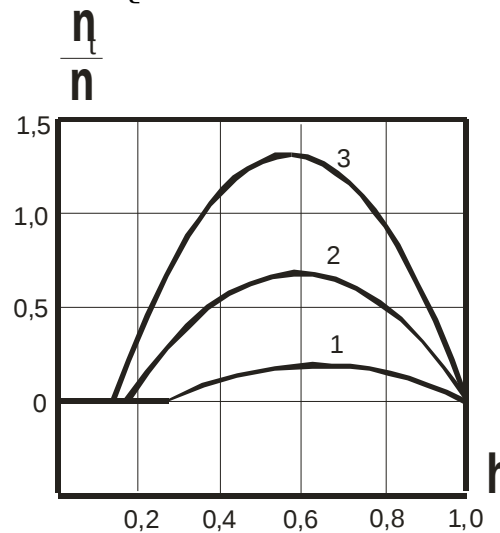
Рівняння для розрахунку параметра ε_m

$$\varepsilon_m = 0,03 + \left\{ \frac{0,7 \cdot 10^{-4} Re \left(10 + 3 \cdot 10^{-3} Re_2 \right)^{1,05} \left(\frac{v}{v_s} \right)^{1,1}}{1,5 (30 + 0,05 Re_2)^{0,2} \left\{ \left[Re_2 \left(5 \cdot 10^{-4} - \frac{3 \cdot 10^{-3}}{Re_2^{0,3}} \right) \right]^{2,3} + \frac{40}{(0,25 Re)^{0,07}} \right\}} \right\}$$



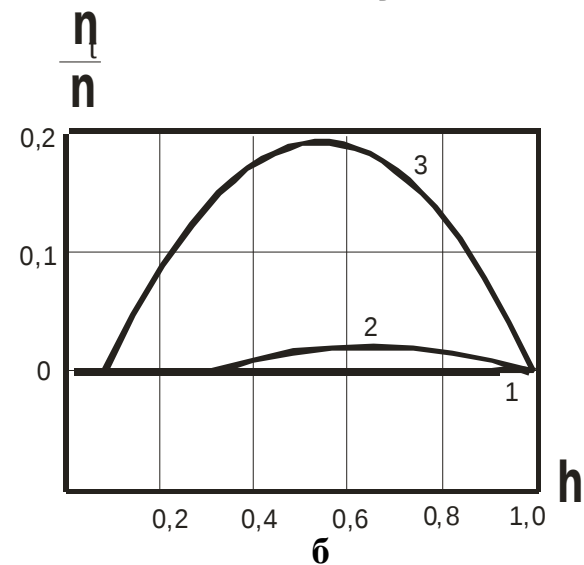
Залежність $\varepsilon_m = f(Re_2)$ за співвідношенням для води при $t = 100 \text{ }^\circ\text{C}$:

1 – $\Gamma_v = 0,05 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$; 2 – $0,1 \cdot 10^{-3}$; 3 – $0,2 \cdot 10^{-3}$; 4 – $0,3 \cdot 10^{-3}$; 5 – $0,5 \cdot 10^{-3}$.

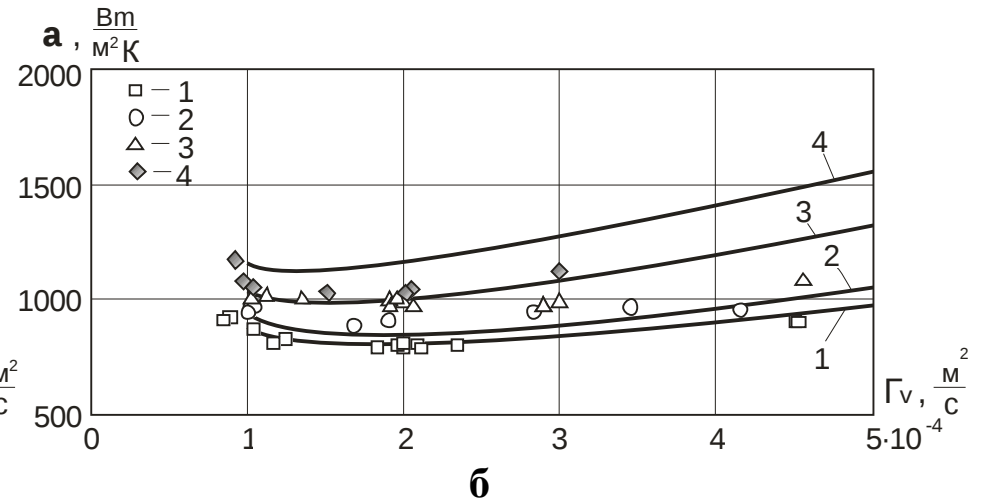
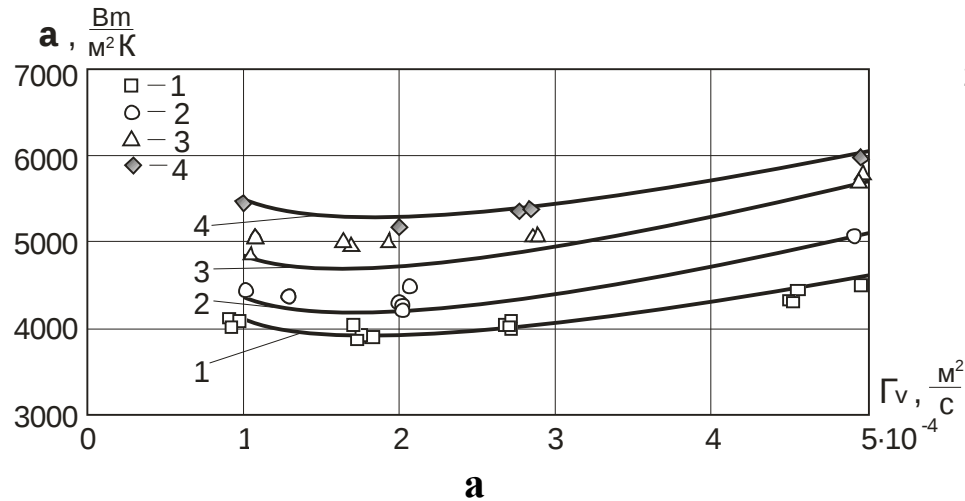


Залежність $\frac{v_t}{v} = f(\eta)$ за співвідношеннями:

а) вода при $t = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, $u_2 = 10 \text{ м/с}$; б) цукровий сироп при $CP = 70 \%$ $t = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, $u_2 = 10 \text{ м/с}$. 1 – $\Gamma_v = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$; 2 – $0,3 \cdot 10^{-3}$; 3 – $0,5 \cdot 10^{-3}$.



Результати математичного моделювання процесів теплообміну при випаровуванні з поверхні насичених плівок розчинів



Залежність $\alpha = f(\Gamma_v)$ при різних значеннях швидкості пари:

а) вода;

б) цукровий розчин концентрацією 70 %;

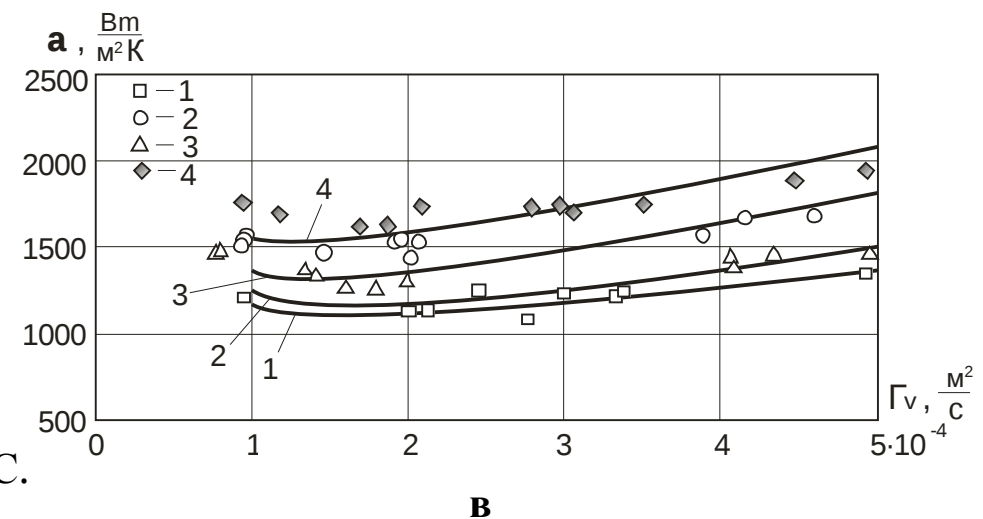
в) цукровий розчин концентрацією 60 %;

лінії відповідають розрахунку

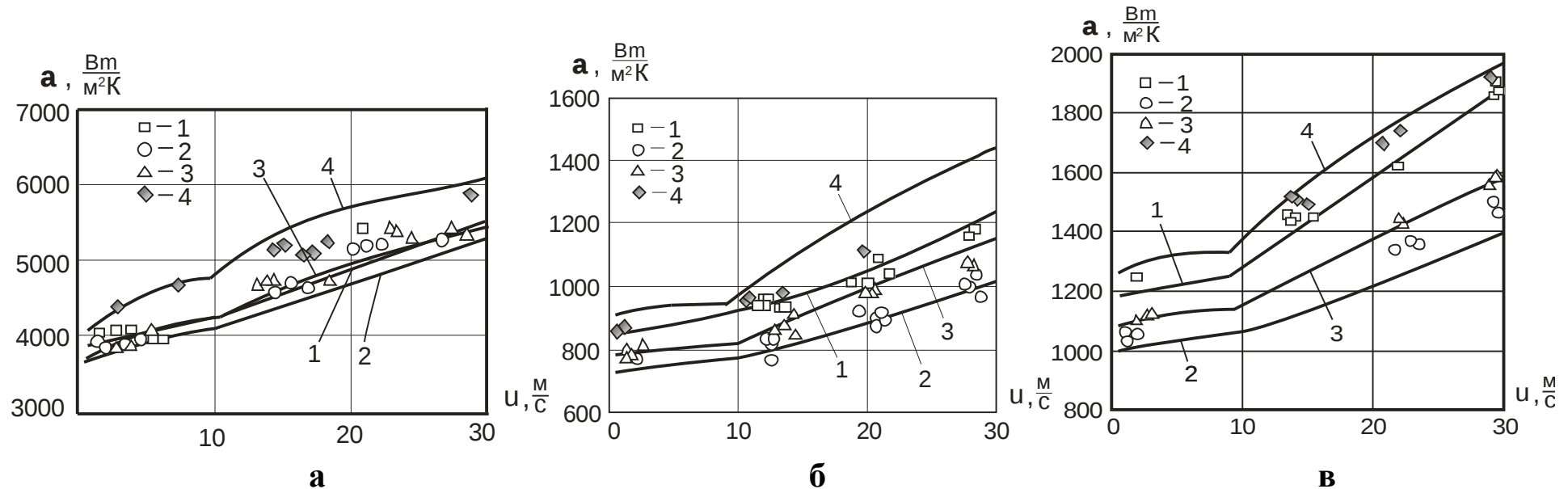
за співвідношеннями (29, 33, 31, 32),

1 – $u_2 = 5$ м/с; 2 – 12; 3 – 20; 4 – 30;

експериментальні точки відповідають тим же значенням швидкості пари при $t = 100$ °С, $\Delta t = 2$ °С.



Результати математичного моделювання процесів теплообміну при випаровуванні з поверхні насичених плівок розчинів



Залежність $\alpha = f(u_2)$ при різних щільностях зрошення:

а) вода;

б) цукровий розчин концентрацією 70 %;

в) цукровий розчин концентрацією 60 %;

лінії відповідають розрахунку за співвідношеннями,

1 – $\Gamma_v = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$; 2 – $0,2 \cdot 10^{-3}$; 3 – $0,3 \cdot 10^{-3}$; 4 – $0,5 \cdot 10^{-3}$;

експериментальні точки відповідають тимже щільностям зрошення при $t = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta t = 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

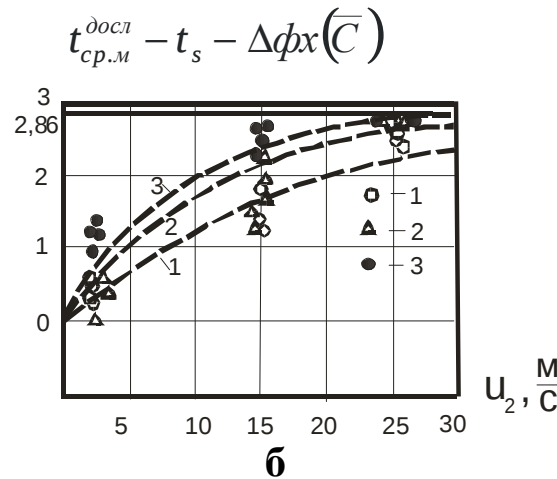
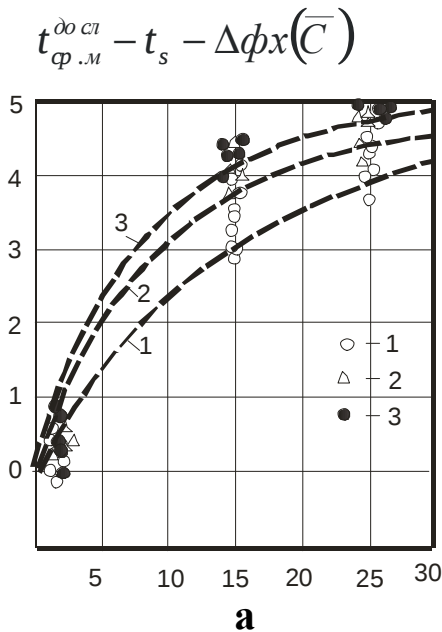
Результати фізичного моделювання теплообміну при пароутворенні в кільцевих низхідних потоках цукрових розчинів

Середньомасова температура плівки $\bar{t} = \frac{t_{cm} + t_s + \Delta\phi x(\bar{C})}{2}$

Температурний напір

$$\Delta t_{кор}^{до сл} = t_{cm} - t_{ср.м}^{до сл} \quad \Delta t_{кор}^{розр} = t_{cm} - t_s - \Delta\phi x(\bar{C}) \quad \delta\Delta t = \Delta t_{кор}^{розр} - \Delta t_{кор}^{до сл} = t_{ср.м}^{до сл} - t_s - \Delta\phi x(\bar{C})$$

$$\Delta t = t_{cm} - t_s - \Delta\phi x(\bar{C}) + \delta\Delta t$$



Залежність різниці між розрахунковою температурою насичення цукрових розчинів та дослідною середньомасовою температурою плівки

$$\delta\Delta t = \Delta t_{кор}^{розр} - \Delta t_{кор}^{до сл} = t_{ср.м}^{до сл} - t_s - \Delta\phi x(\bar{C})$$

від швидкості пари:

а) $CP = 70\%$, $\Delta\phi x = 5^\circ C$;

б) $CP = 60\%$, $\Delta\phi x = 2,86^\circ C$;

точки: 1 – $\Gamma_v = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$;

2 – $0,3 \cdot 10^{-3}$; 3 – $0,5 \cdot 10^{-3}$;

лінії – розрахунок за співвідношенням

Температурна функція

$$\delta\Delta t = \Delta\phi x \left[1 - \exp \left(-0,014 \cdot \frac{\sqrt[3]{\frac{u_2^3 \Gamma_v}{g^2}}}{\sqrt{\frac{\sigma}{g\rho}}} \right) \right]$$

Результати фізичного моделювання теплообміну при пароутворенні в кільцевих низхідних потоках цукрових розчинів

Тепловіддача при випаровуванні з вільної поверхні

$$Nu = 1,1 Re^{-\frac{1}{3}} \frac{0,85 + 0,01 Pe^{0,2} + 4,5 \cdot 10^{-4} Pe^{0,86} Pr^{-0,2}}{\exp(-1,2 \cdot 10^{-5} Re_n)}$$

Мінімальне перегрівання стінки відносно температури насичення

$$\Delta t_{min} = \frac{2\sigma T_n}{r\rho_2 R_c}$$

$$\Delta t_{min} = \frac{2\sigma T_n}{r\rho_2 R_c} + \Delta\phi x$$

Параметр, що характеризує процес інтенсифікації тепловіддачі при наявності кипіння

$$K_t = 1 + c \left(\frac{\Delta t - \Delta t_{min}}{\Delta t_{min}} \right)^n$$

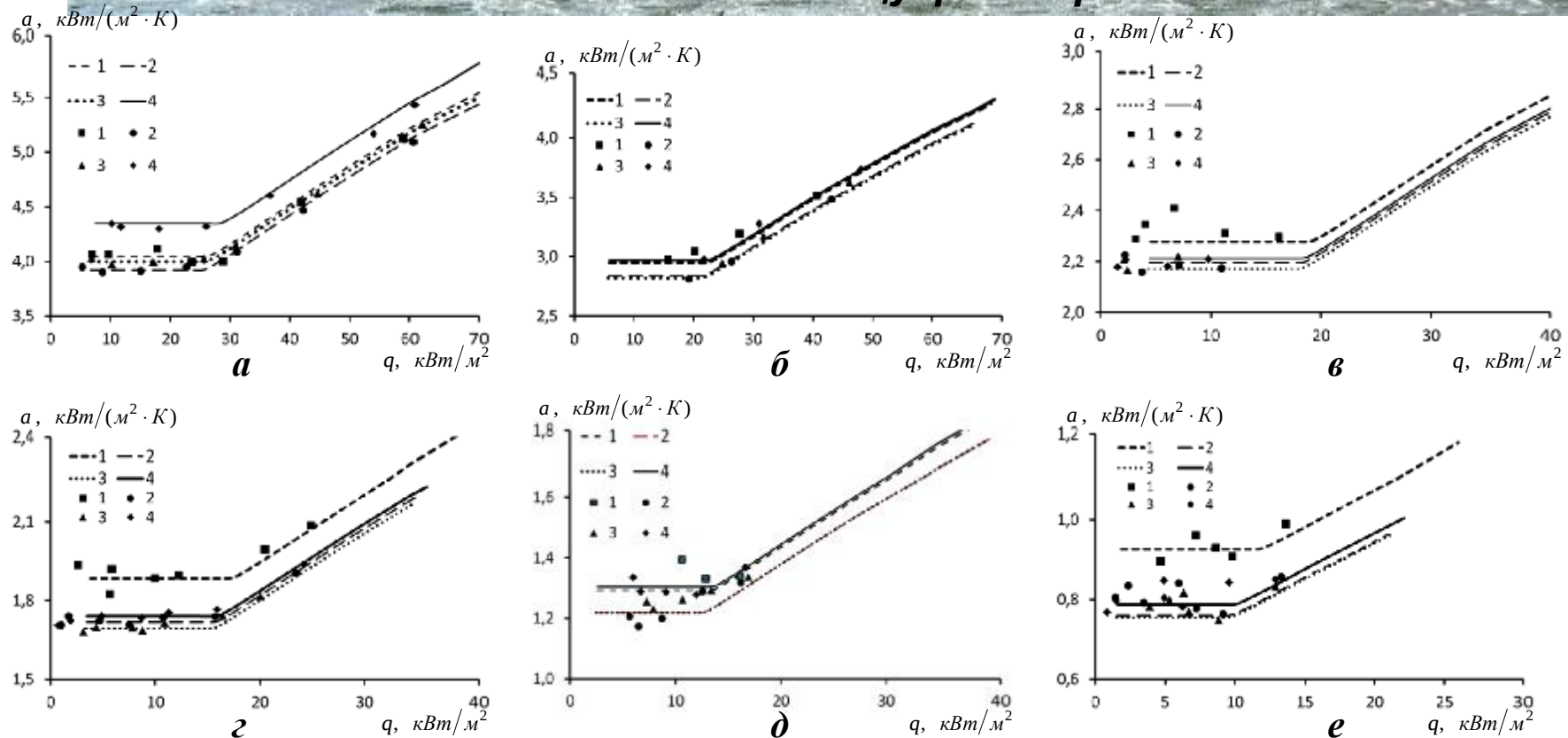
Узагальнююче рівняння при $\Delta t \geq \Delta t_{min}$

$$Nu = 1,1 Re^{-\frac{1}{3}} \frac{0,85 + 0,01 Pe^{0,2} + 4,5 \cdot 10^{-4} Pe^{0,86} Pr^{-0,2}}{\exp(-1,2 \cdot 10^{-5} Re_n)} \left[1 + 0,4 \left(\frac{\Delta t - \Delta t_{min}}{\Delta t_{min}} \right) \right]^{1,2} \left(\frac{L}{L_o} \right)^{0,1}$$

Узагальнююче рівняння при $\Delta t < \Delta t_{min}$

$$Nu = 1,1 Re^{-\frac{1}{3}} \frac{0,85 + 0,01 Pe^{0,2} + 4,5 \cdot 10^{-4} Pe^{0,86} Pr^{-0,2}}{\exp(-1,2 \cdot 10^{-5} Re_n)} \left(\frac{L}{L_o} \right)^{0,1}$$

Результати узагальнень експериментальних даних з тепловіддачі до насичених плівок цукрових розчинів

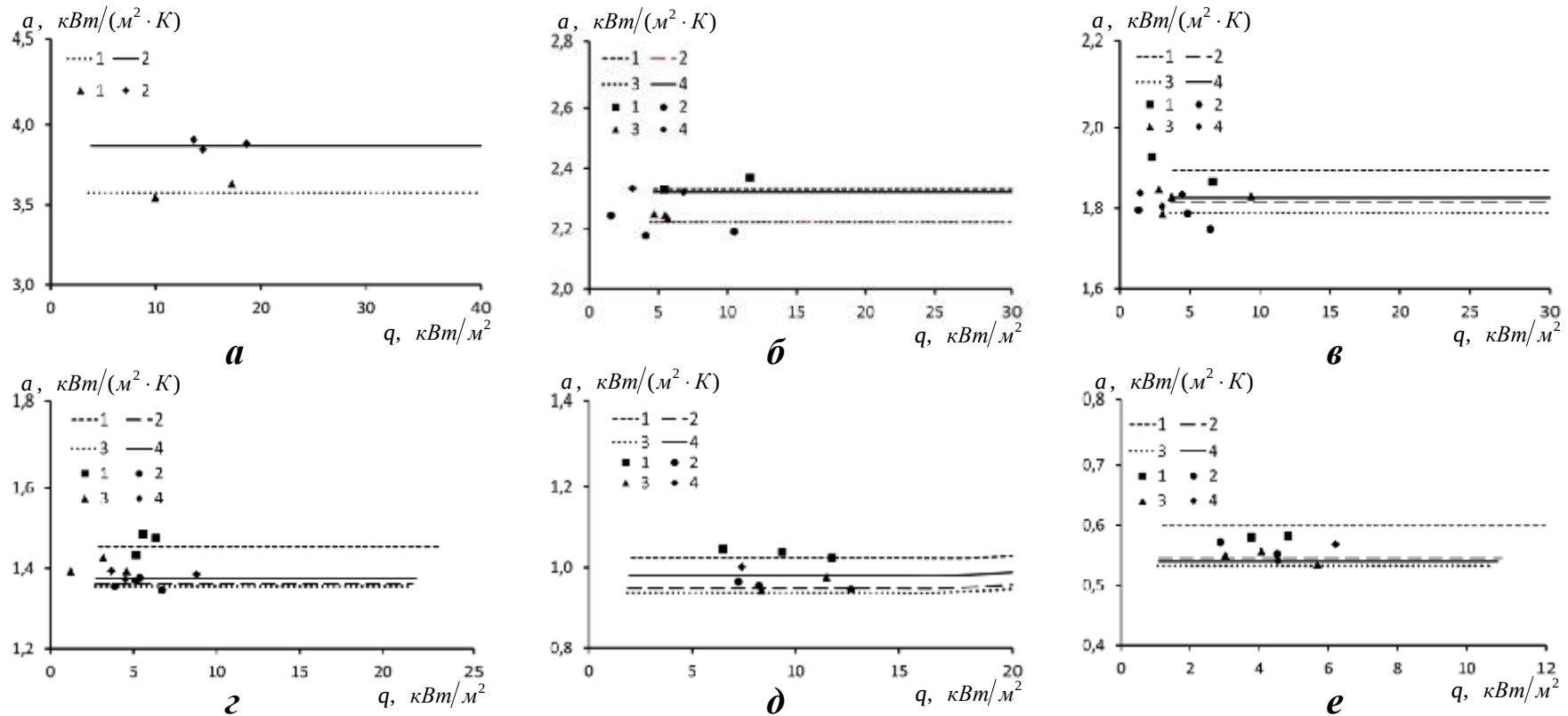


Залежність інтенсивності тепловіддачі від величини теплового потоку при атмосферному тиску при різних щільностях зрошення

(без вдування пари, точки – експериментальні дані, лінії відповідають розрахунку за узагальнюючим рівнянням при тих же щільностях зрошення):

- а.** вода, точки: 1 – $\Gamma_v = 1 \cdot 10^{-4}$ м²/с; 2 – $2 \cdot 10^{-4}$; 3 – $3 \cdot 10^{-4}$; 4 – $5,5 \cdot 10^{-4}$;
- б.** цукровий розчин концентрацією 30 %, точки: 1 – $\Gamma_v = 1 \cdot 10^{-4}$ м²/с; 2 – $1,6 \cdot 10^{-4}$; 3 – $2,2 \cdot 10^{-4}$; 4 – $4,5 \cdot 10^{-4}$;
- в.** цукровий розчин концентрацією 40 %, точки: 1 – $\Gamma_v = 1 \cdot 10^{-4}$ м²/с; 2 – $1,5 \cdot 10^{-4}$; 3 – $2 \cdot 10^{-4}$; 4 – $3,5 \cdot 10^{-4}$;
- г.** цукровий розчин концентрацією 50 %, точки: 1 – $\Gamma_v = 0,7 \cdot 10^{-4}$ м²/с; 2 – $1,5 \cdot 10^{-4}$; 3 – $2,2 \cdot 10^{-4}$; 4 – $4 \cdot 10^{-4}$;
- д.** цукровий розчин концентрацією 60 %, точки: 1 – $\Gamma_v = 1 \cdot 10^{-4}$ м²/с; 2 – $2 \cdot 10^{-4}$; 3 – $3 \cdot 10^{-4}$; 4 – $6 \cdot 10^{-4}$;
- е.** цукровий розчин концентрацією 70 %, точки: 1 – $\Gamma_v = 0,5 \cdot 10^{-4}$ м²/с; 2 – $2 \cdot 10^{-4}$; 3 – $3 \cdot 10^{-4}$; 4 – $5,5 \cdot 10^{-4}$.

Результати узагальнень експериментальних даних з тепловіддачі до насичених плівок цукрових розчинів

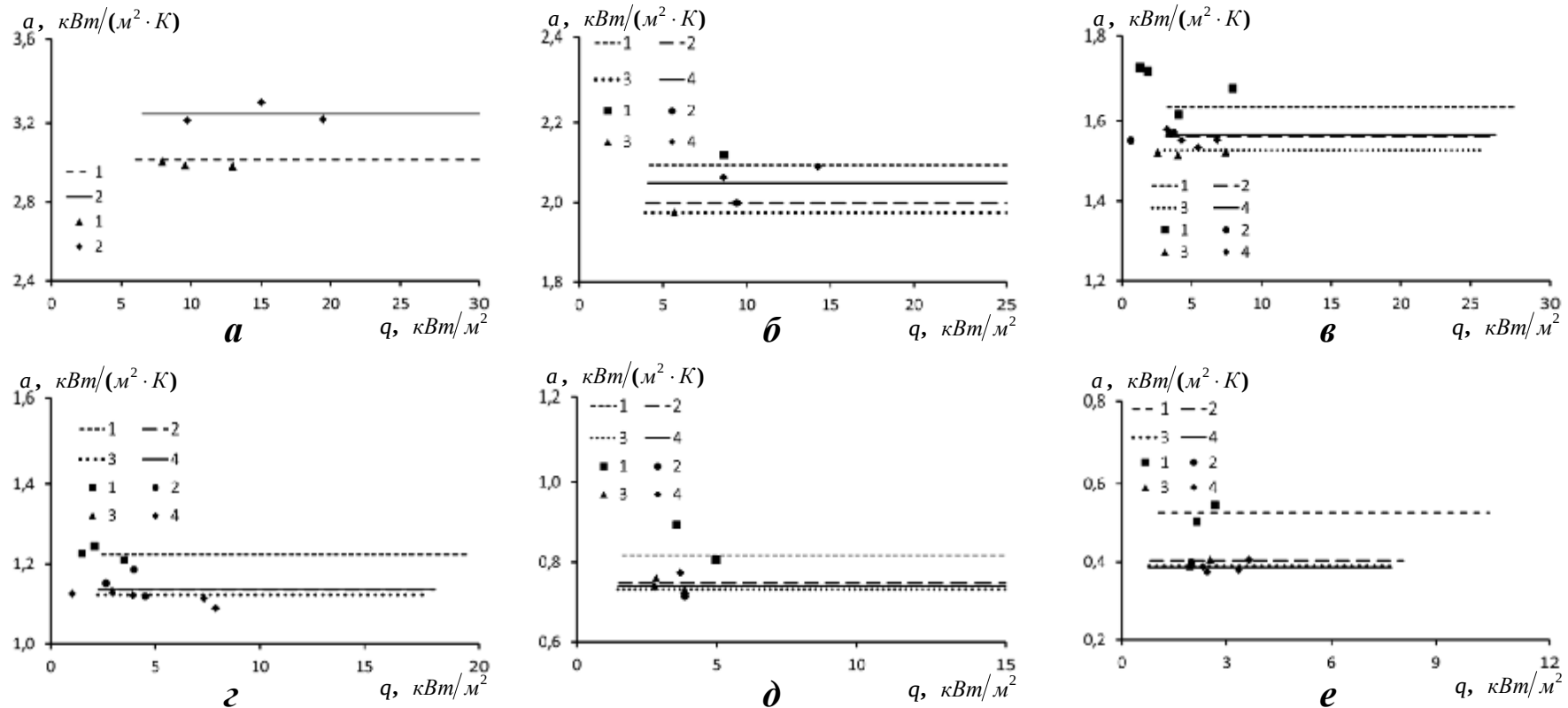


Залежність інтенсивності тепловіддачі від величини теплового потоку в області розрідження при різних щільностях зрошення

($P_{\text{вак}} = 64362 \text{ Па}$, без вдування пари, точки – експериментальні дані, лінії відповідають розрахунку за узагальнюючим рівнянням при тих же щільностях зрошення):

- а.** вода, точки: 1 – $\Gamma_v = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; 2 – $5,5 \cdot 10^{-4}$;
- б.** цукровий розчин концентрацією 30 %, точки: 1 – $\Gamma_v = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; 2 – $1,8 \cdot 10^{-4}$; 3 – $2,8 \cdot 10^{-4}$; 4 – $4,7 \cdot 10^{-4}$;
- в.** цукровий розчин концентрацією 40 %, точки: 1 – $\Gamma_v = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; 2 – $1,5 \cdot 10^{-4}$; 3 – $2 \cdot 10^{-4}$; 4 – $4 \cdot 10^{-4}$;
- г.** цукровий розчин концентрацією 50 %, точки: 1 – $\Gamma_v = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; 2 – $2 \cdot 10^{-4}$; 3 – $3 \cdot 10^{-4}$; 4 – $4 \cdot 10^{-4}$;
- д.** цукровий розчин концентрацією 60 %, точки: 1 – $\Gamma_v = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; 2 – $2 \cdot 10^{-4}$; 3 – $3 \cdot 10^{-4}$; 4 – $6 \cdot 10^{-4}$;
- е.** цукровий розчин концентрацією 70 %, точки: 1 – $\Gamma_v = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; 2 – $2 \cdot 10^{-4}$; 3 – $3 \cdot 10^{-4}$; 4 – $5,5 \cdot 10^{-4}$.

Результати узагальнень експериментальних даних з тепловіддачі до насичених плівок цукрових розчинів

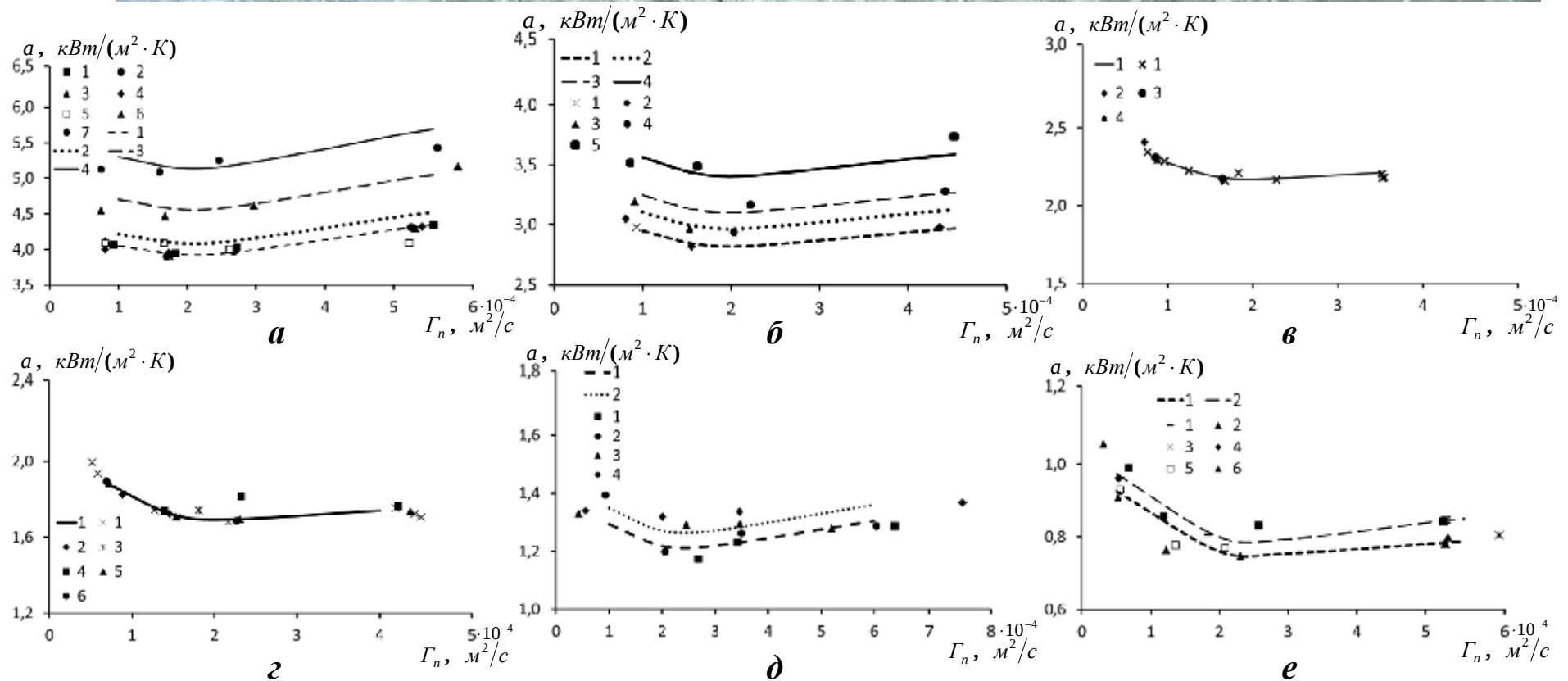


Залежність інтенсивності тепловіддачі від величини теплового потоку в області розрідження при різних щільностях зрошення

($P_{\text{вак}} = 84013 \text{ Па}$, без вдування пари, точки – експериментальні дані, лінії відповідають розрахунку за узагальнюючим рівнянням при тих же щільностях зрошення):

- а.** вода, точки: 1 – $\Gamma_v = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; 2 – $5,5 \cdot 10^{-4}$;
б. цукровий розчин концентрацією 30 %, точки: 1 – $\Gamma_v = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; 2 – $1,6 \cdot 10^{-4}$; 3 – $2,6 \cdot 10^{-4}$; 4 – $4,6 \cdot 10^{-4}$;
в. цукровий розчин концентрацією 40 %, точки: 1 – $\Gamma_v = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; 2 – $1,5 \cdot 10^{-4}$; 3 – $3 \cdot 10^{-4}$; 4 – $4,5 \cdot 10^{-4}$;
г. цукровий розчин концентрацією 50 %, точки: 1 – $\Gamma_v = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; 2 – $2,3 \cdot 10^{-4}$; 3 – $3 \cdot 10^{-4}$; 4 – $4,2 \cdot 10^{-4}$;
д. цукровий розчин концентрацією 60 %, точки: 1 – $\Gamma_v = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; 2 – $2 \cdot 10^{-4}$; 3 – $3 \cdot 10^{-4}$; 4 – $5 \cdot 10^{-4}$;
е. цукровий розчин концентрацією 70 %, точки: 1 – $\Gamma_v = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; 2 – $2 \cdot 10^{-4}$; 3 – $3 \cdot 10^{-4}$; 4 – $5,5 \cdot 10^{-4}$.

Результати узагальнень експериментальних даних з тепловіддачі до насичених плівок цукрових розчинів

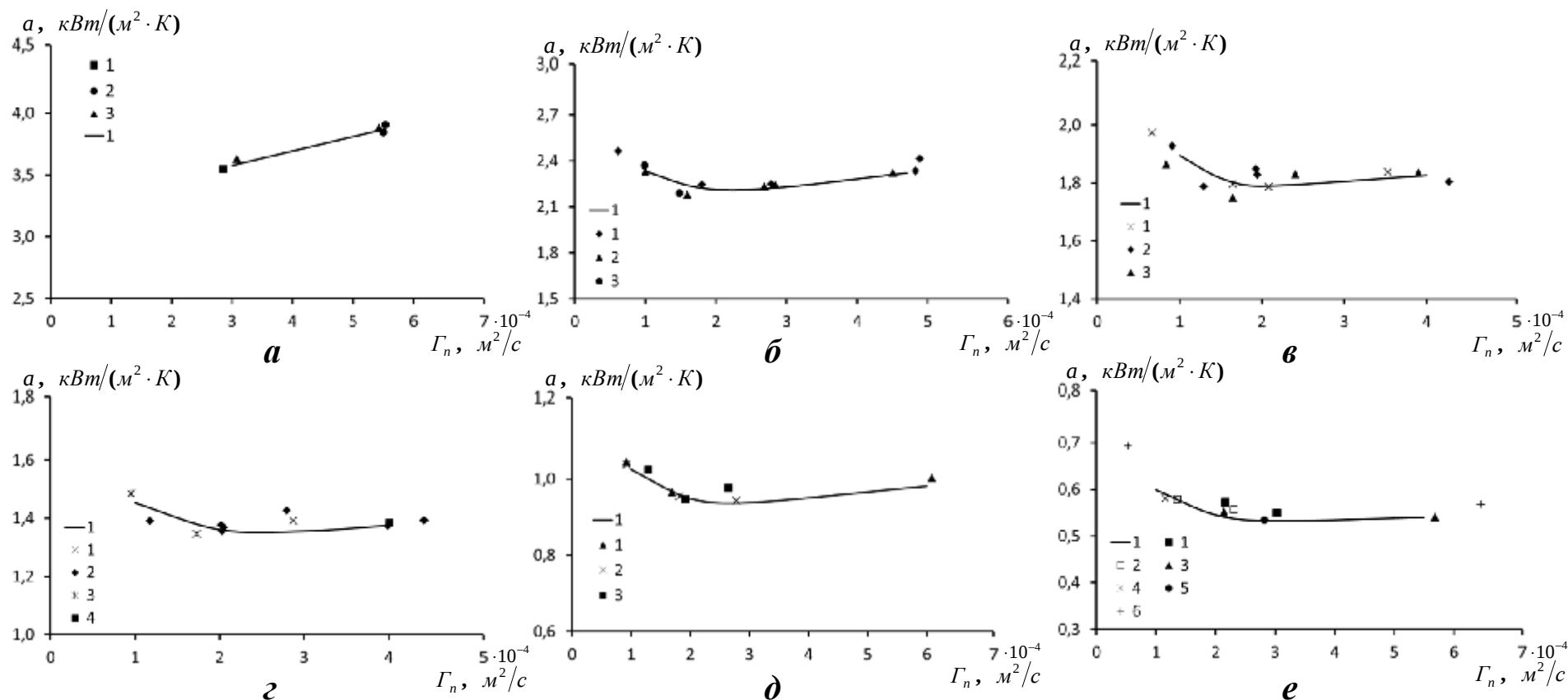


Залежність інтенсивності тепловіддачі від щільності зрошення при атмосферному тиску при різних різниці температур між стінкою труби і середньомасовою температурою плівки

(без вдування пари, точки – експериментальні данні, лінії – розрахунок за узагальнюючим рівнянням):

а. вода, точки: 1 – $\Delta t = 1,7$ °C; 2 – 2,5; 3 – 9; 4 – 6; 5 – 7,5; 6 – 9,6; 7 – 11,8; лінії: 1 – $\Delta t = 6$ °C; 2 – 7,5; 3 – 9,6; 4 – 11,8; **б.** цукровий розчин концентрацією 30 %, точки: 1 – $\Delta t = 5$ °C; 2 – 7; 3 – 9; 4 – 10; 5 – 12; лінії: 1 – $\Delta t = 6$ °C; 2 – 9; 3 – 10,6; 4 – 12; **в.** цукровий розчин концентрацією 40 %, точки: 1 – $\Delta t = 2$ °C; 2 – 4; 3 – 5; 4 – 6; лінії: $\Delta t = 6$ °C; **г.** цукровий розчин концентрацією 50 %, точки: 1 – $\Delta t = 1$ °C; 2 – 3; 3 – 4; 4 – 5; 5 – 7; 6 – 8; лінії: $\Delta t = 6$ °C; **д.** цукровий розчин концентрацією 60 %, точки: 1 – $\Delta t = 6$ °C; 2 – 7,5; 3 – 10; 4 – 12; лінії: 1 – $\Delta t = 10$ °C; 2 – 12; **е.** цукровий розчин концентрацією 70 %, точки: 1 – $\Delta t = 2$ °C; 2 – 3,5; 3 – 4; 4 – 5; 5 – 6; 6 – 7; 8 – 9; 9 – 12; лінії: 1 – $\Delta t = 12$ °C; 2 – 15.

Результати узагальнень експериментальних даних з тепловіддачі до насичених плівок цукрових розчинів



Залежність інтенсивності тепловіддачі від щільності зрошення в області розрідження при різній різниці температур між стінкою труби і середньомасовою температурою плівки

($P_{\text{вак}} = 64362 \text{ Па}$, без вдування пари, точки – експериментальні данні, лінії – розрахунок за узагальнюючим рівнянням):

а. вода, точки: 1 – $\Delta t = 3 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 – 4; 3 – 5; лінії: $\Delta t = 7$;

б. цукровий розчин концентрацією 30 %, точки: 1 – $\Delta t = 2 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 – 3; 3 – 6; лінії: $\Delta t = 6 \text{ }^\circ\text{C}$;

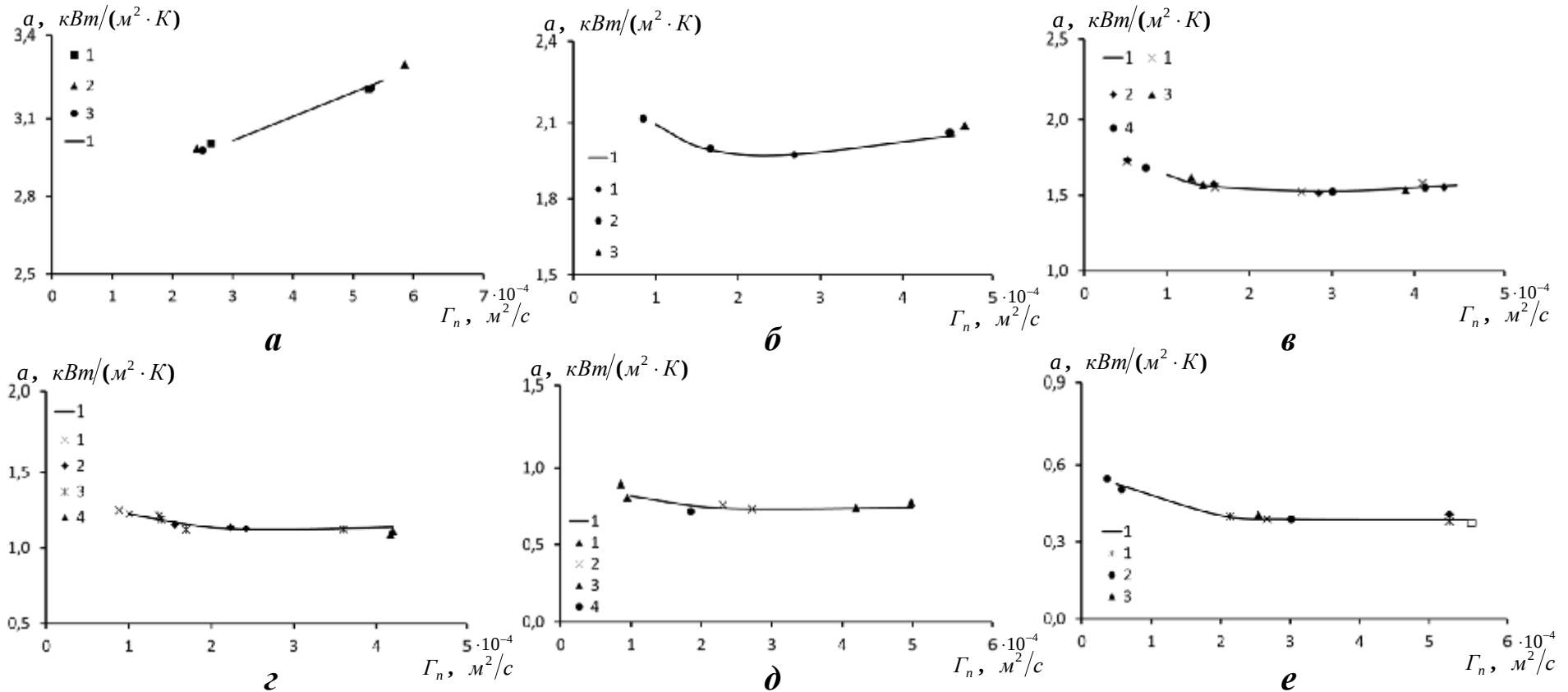
в. цукровий розчин концентрацією 40 %, точки: 1 – $\Delta t = 2 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 – 3; 3 – 4; лінії: $\Delta t = 6 \text{ }^\circ\text{C}$;

г. цукровий розчин концентрацією 50 %, точки: 1 – $\Delta t = 2 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 – 3; 3 – 4; 4 – 6; лінії: $\Delta t = 6 \text{ }^\circ\text{C}$;

д. цукровий розчин концентрацією 60 %, точки: 1 – $\Delta t = 6 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 – 8; 3 – 10; л лінії: $\Delta t = 10 \text{ }^\circ\text{C}$;

е. цукровий розчин концентрацією 70 %, точки: 1 – $\Delta t = 5 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 – 7; 3 – 8; 4 – 9; 5 – 10; 6 – 11; лінії: $\Delta t = 5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Результати узагальнень експериментальних даних з тепловіддачі до насичених плівок цукрових розчинів



Залежність інтенсивності тепловіддачі від щільності зрошення в області розрідження при різних різниці температур між стінкою труби і середньомасовою температурою плівки ($P_{\text{вак}} = 84013 \text{ Па}$, без вдування пари, точки – експериментальні данні, лінії – розрахунок за узагальнюючим рівнянням):

а. вода, точки: 1 – $\Delta t = 3,5^\circ\text{C}$; 2 – 4,5; 3 – 6; лінії: $\Delta t = 7$;

б. цукровий розчин концентрацією 30 %, точки: 1 – $\Delta t = 3^\circ\text{C}$; 2 – 5; 3 – 6; лінії: $\Delta t = 6^\circ\text{C}$;

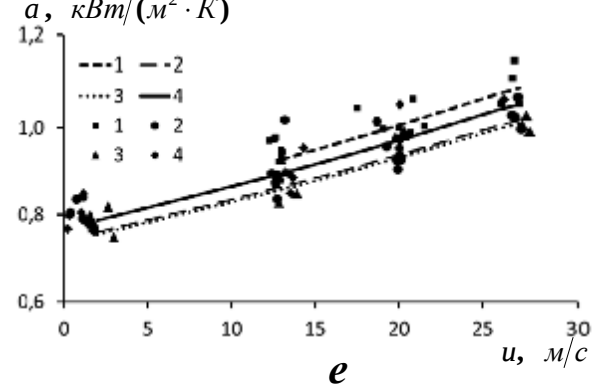
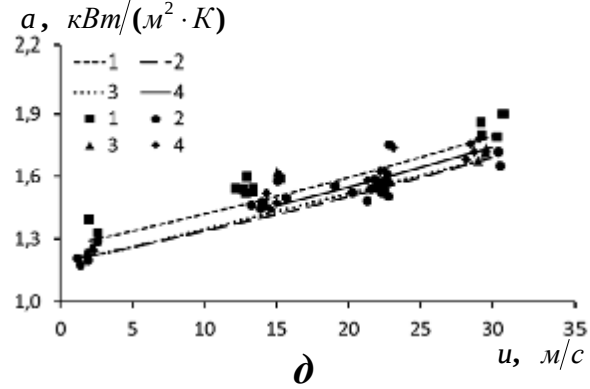
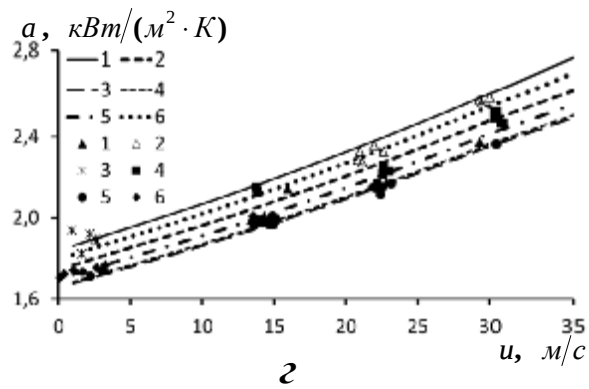
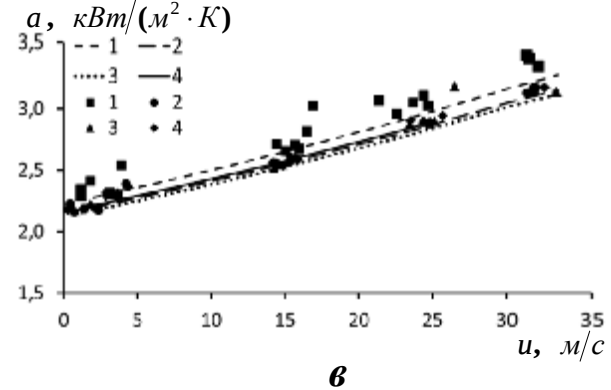
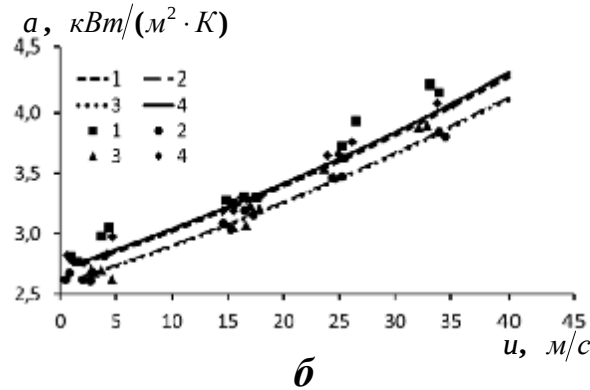
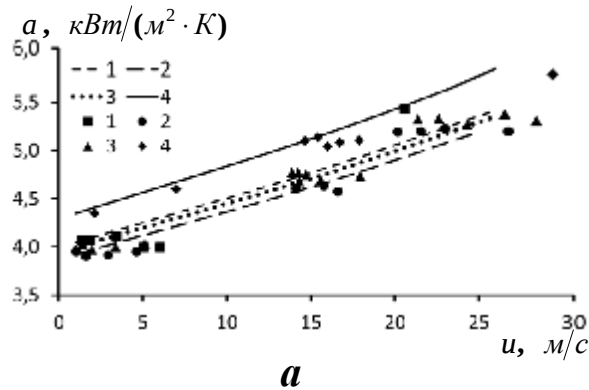
в. цукровий розчин концентрацією 40 %, точки: 1 – $\Delta t = 2^\circ\text{C}$; 2 – 3; 3 – 4; 4 – 5; лінії: $\Delta t = 6^\circ\text{C}$;

г. цукровий розчин концентрацією 50 %, точки: 1 – $\Delta t = 1^\circ\text{C}$; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 6; лінії: $\Delta t = 6^\circ\text{C}$;

д. цукровий розчин концентрацією 60 %, точки: 1 – $\Delta t = 3^\circ\text{C}$; 2 – 4; 3 – 5; 4 – 6; лінії: $\Delta t = 10^\circ\text{C}$;

е. цукровий розчин концентрацією 70 %, точки: 1 – $\Delta t = 4,5^\circ\text{C}$; 2 – 5; 3 – 6; 4 – 7; 5 – 8; лінії: $\Delta t = 5^\circ\text{C}$.

Результати узагальнень експериментальних даних з тепловіддачі до насичених плівок цукрових розчинів



Залежність інтенсивності тепловіддачі від швидкості вторинної пари при атмосферному тиску при різних щільностях

(точки – експериментальні дані, лінії – розрахунок за узагальнюючим рівнянням при тих же щільностях зрошення):

а. вода, точки: 1 – $\Gamma_v = 1 \cdot 10^{-4}$ м²/с; 2 – $2 \cdot 10^{-4}$; 3 – $3 \cdot 10^{-4}$; 4 – $5,5 \cdot 10^{-4}$;

б. цукровий розчин концентрацією 30 %, точки: 1 – $\Gamma_v = 1 \cdot 10^{-4}$ м²/с; 2 – $1,6 \cdot 10^{-4}$; 3 – $2,2 \cdot 10^{-4}$; 4 – $4,5 \cdot 10^{-4}$;

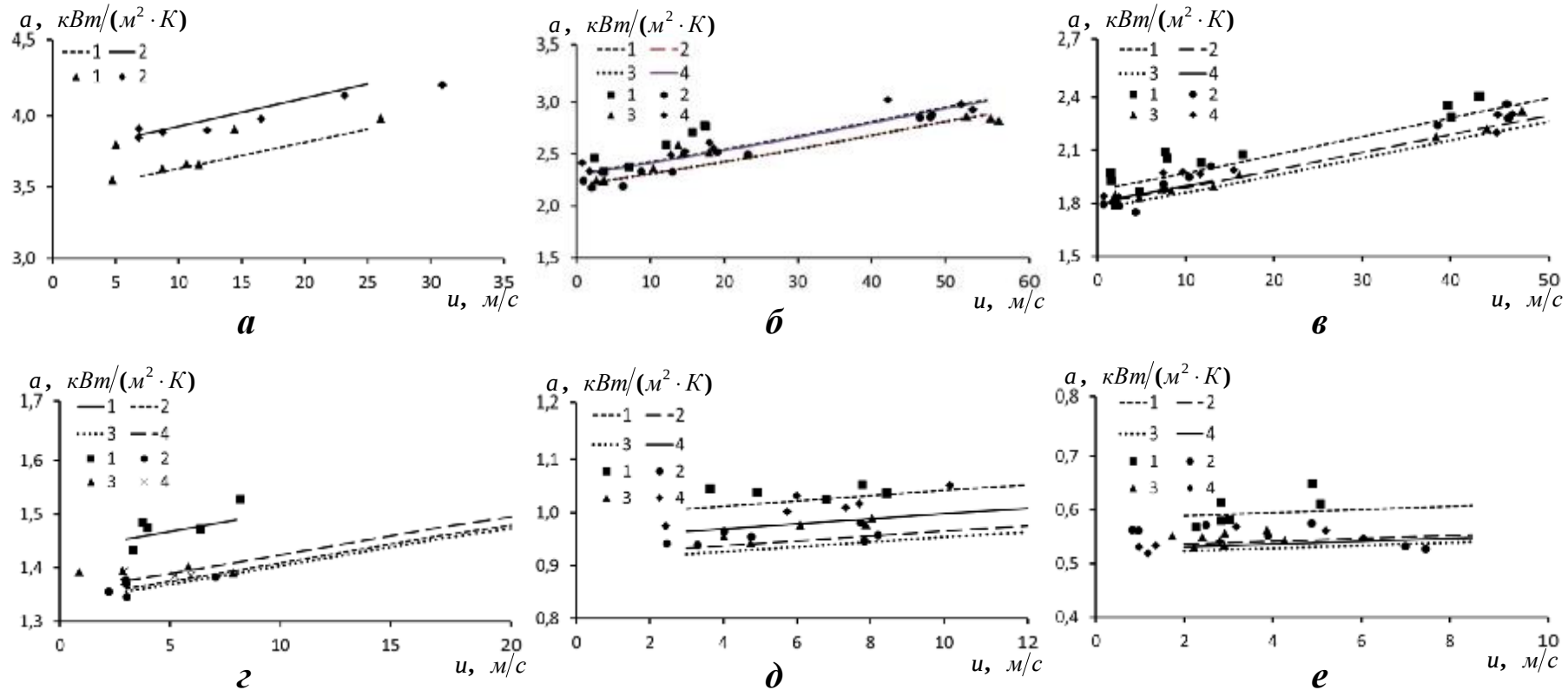
в. цукровий розчин концентрацією 40 %, точки: 1 – $\Gamma_v = 1 \cdot 10^{-4}$ м²/с; 2 – $1,5 \cdot 10^{-4}$; 3 – $2 \cdot 10^{-4}$; 4 – $3,5 \cdot 10^{-4}$;

г. цукровий розчин концентрацією 50 %, точки: 1 – $\Gamma_v = 0,7 \cdot 10^{-4}$ м²/с; 2 – $1 \cdot 10^{-4}$; 3 – $2 \cdot 10^{-4}$; 4 – $3 \cdot 10^{-4}$; 5 – $4 \cdot 10^{-4}$; 6 – $6 \cdot 10^{-4}$;

д. цукровий розчин концентрацією 60 %, точки: 1 – $\Gamma_v = 1 \cdot 10^{-4}$ м²/с; 2 – $2 \cdot 10^{-4}$; 3 – $3 \cdot 10^{-4}$; 4 – $4,5 \cdot 10^{-4}$;

е. цукровий розчин концентрацією 70 %, точки: 1 – $\Gamma_v = 1 \cdot 10^{-4}$ м²/с; 2 – $2 \cdot 10^{-4}$; 3 – $3 \cdot 10^{-4}$; 4 – $5,5 \cdot 10^{-4}$.

Результати узагальнень експериментальних даних з тепловіддачі до насичених плівок цукрових розчинів



Залежність інтенсивності тепловіддачі від швидкості вторинної пари в області розрідження при різних щільностях зрошення

($P_{\text{вак}} = 64362 \text{ Па}$, точки – експериментальні дані, лінії – розрахунок за узагальнюючим рівнянням при тих же щільностях зрошення):

а. вода, точки: 1 – $\Gamma_v = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; 2 – $5,5 \cdot 10^{-4}$;

б. цукровий розчин концентрацією 30 %, точки: 1 – $\Gamma_v = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; 2 – $1,8 \cdot 10^{-4}$; 3 – $2,8 \cdot 10^{-4}$; 4 – $4,7 \cdot 10^{-4}$;

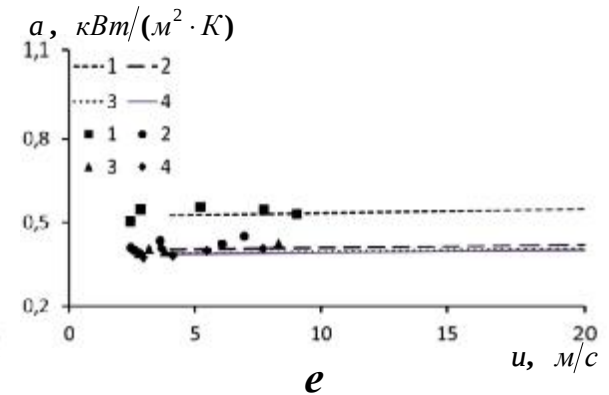
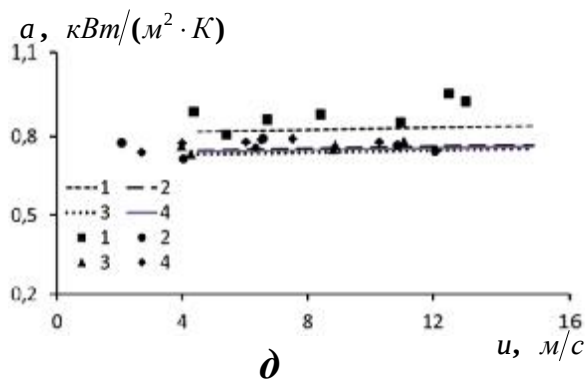
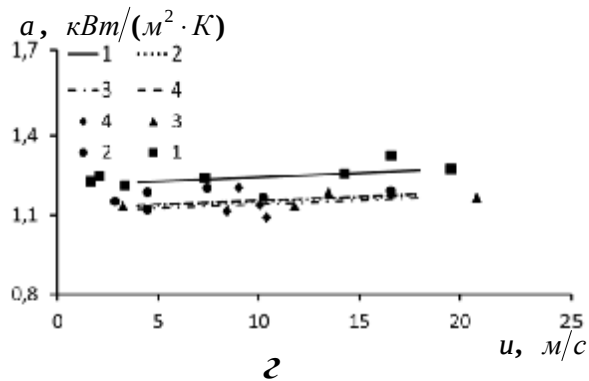
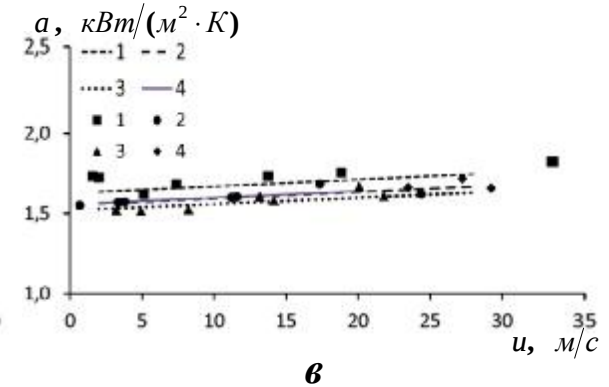
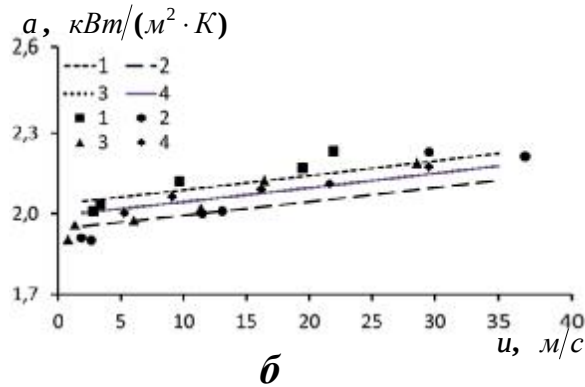
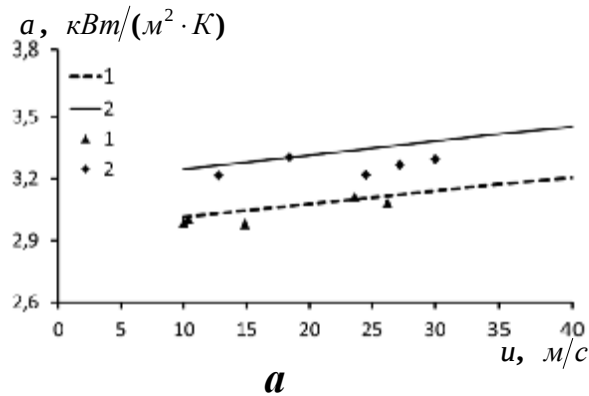
в. цукровий розчин концентрацією 40 %, точки: 1 – $\Gamma_v = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; 2 – $1,5 \cdot 10^{-4}$; 3 – $2 \cdot 10^{-4}$; 4 – $4 \cdot 10^{-4}$;

г. цукровий розчин концентрацією 50 %, точки: 1 – $\Gamma_v = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; 2 – $2 \cdot 10^{-4}$; 3 – $3 \cdot 10^{-4}$; 4 – $4 \cdot 10^{-4}$;

д. цукровий розчин концентрацією 60 %, точки: 1 – $\Gamma_v = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; 2 – $2 \cdot 10^{-4}$; 3 – $3 \cdot 10^{-4}$; 4 – $6 \cdot 10^{-4}$;

е. цукровий розчин концентрацією 70 %, точки: 1 – $\Gamma_v = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; 2 – $2 \cdot 10^{-4}$; 3 – $3 \cdot 10^{-4}$; 4 – $5,5 \cdot 10^{-4}$.

Результати узагальнень експериментальних даних з тепловіддачі до насичених плівок цукрових розчинів



Залежність інтенсивності тепловіддачі від швидкості вторинної пари в області розрідження при різних щільностях зрошення

($P_{\text{вак}} = 84013$ Па, точки – експериментальні дані, лінії – розрахунок за узагальнюючим рівнянням при тих же щільностях зрошення):

а. вода, точки: 1 – $\Gamma_v = 3 \cdot 10^{-4}$ м²/с; 2 – $5,5 \cdot 10^{-4}$;

б. цукровий розчин концентрацією 30 %, точки: 1 – $\Gamma_v = 1 \cdot 10^{-4}$ м²/с; 2 – $1,6 \cdot 10^{-4}$; 3 – $2,2 \cdot 10^{-4}$; 4 – $4,5 \cdot 10^{-4}$;

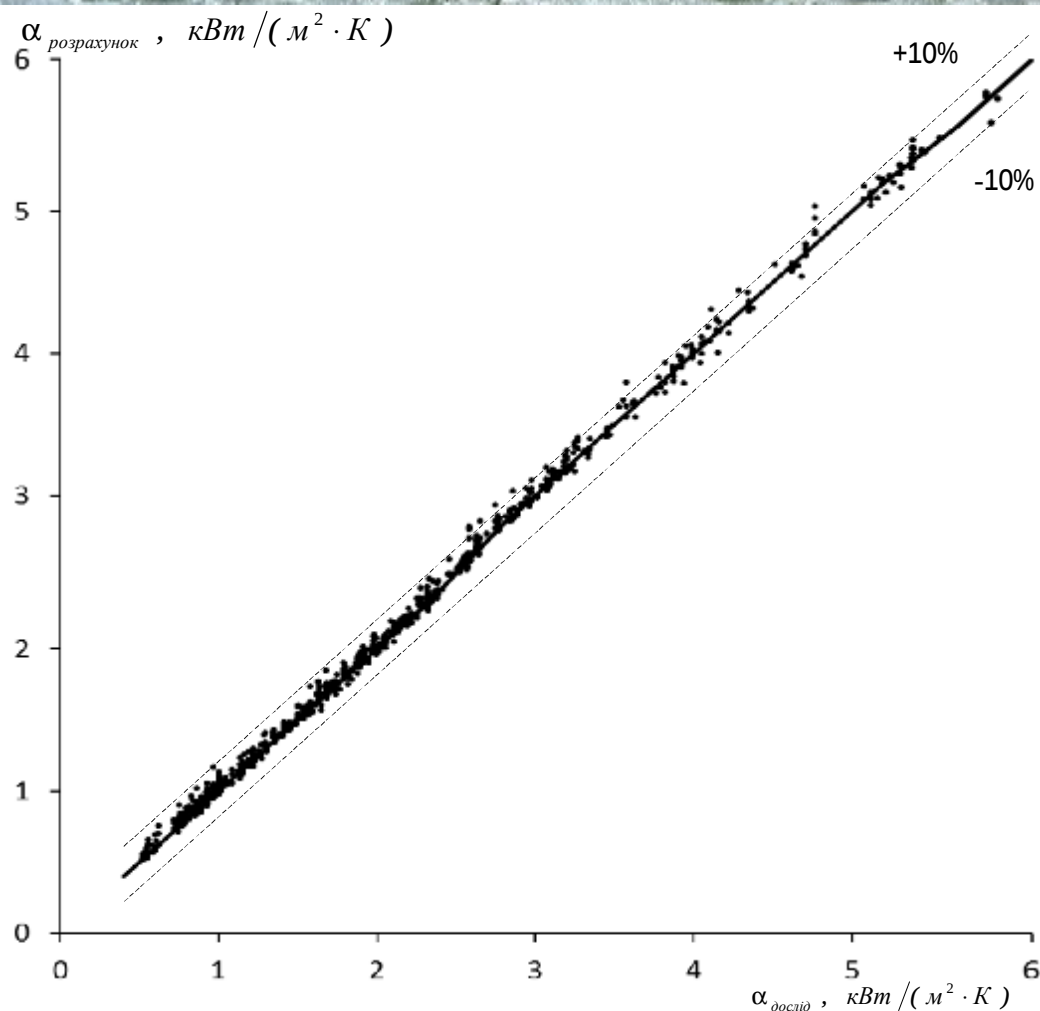
в. цукровий розчин концентрацією 40 %, точки: 1 – $\Gamma_v = 1 \cdot 10^{-4}$ м²/с; 2 – $1,5 \cdot 10^{-4}$; 3 – $3 \cdot 10^{-4}$; 4 – $4,5 \cdot 10^{-4}$;

г. цукровий розчин концентрацією 50 %, точки: 1 – $\Gamma_v = 1 \cdot 10^{-4}$ м²/с; 2 – $2 \cdot 10^{-4}$; 3 – $3 \cdot 10^{-4}$; 4 – $4,2 \cdot 10^{-4}$;

д. цукровий розчин концентрацією 60 %, точки: 1 – $\Gamma_v = 1 \cdot 10^{-4}$ м²/с; 2 – $2 \cdot 10^{-4}$; 3 – $3 \cdot 10^{-4}$; 4 – $5 \cdot 10^{-4}$;

е. цукровий розчин концентрацією 70 %, точки: 1 – $\Gamma_v = 0,5 \cdot 10^{-4}$ м²/с; 2 – $2 \cdot 10^{-4}$; 3 – $3 \cdot 10^{-4}$; 4 – $5,5 \cdot 10^{-4}$.

Порівняння отриманих експериментальних даних з розрахунковими по співвідношенню

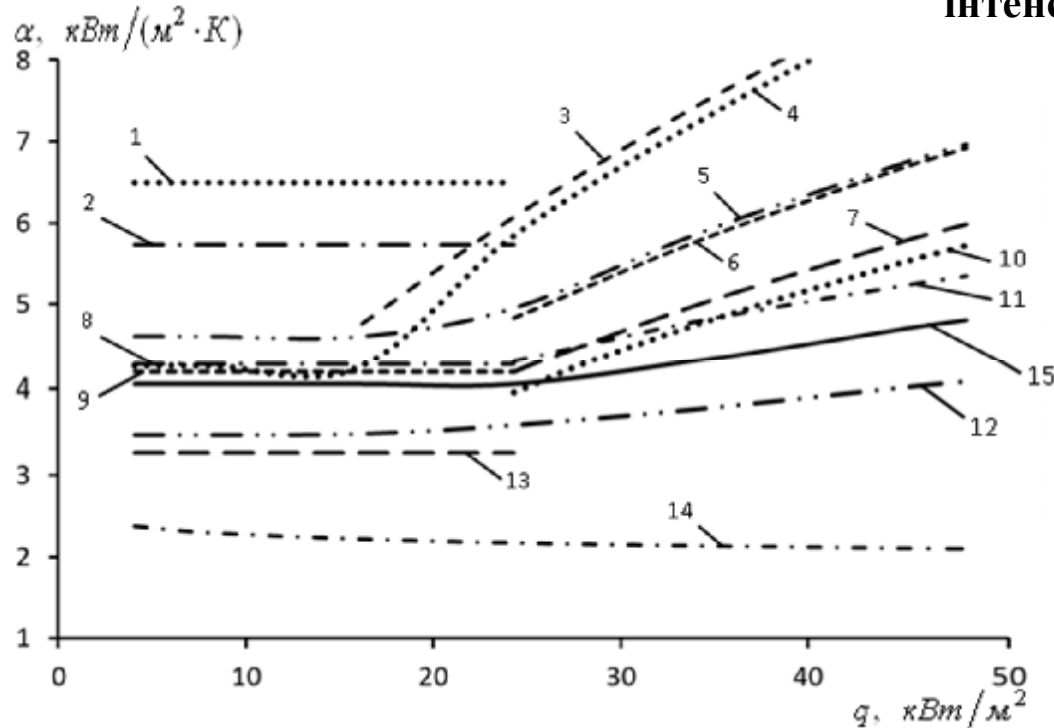


Співставлення інтенсивності тепловіддачі до стікаючої плівки отриманої дослідним шляхом та розрахункової – за узагальнюючим рівнянням, при:

об'ємній щільності зрошення – $(0,4 \dots 5,5) \cdot 10^{-4}$ м²/с; розрідженні – 0...0,084 МПа;
 температурному напорі – 2...20 °С; концентрації – 0...72%; швидкості вторинної пари – 1 ... 45 м/с;
 кінематичній в'язкості – $(0,28 \dots 30) \cdot 10^{-6}$ м²/с; лінія – $a_{\text{дослід}} = a_{\text{розрахунок}}$, точки – дослідні дані.

Порівняння отриманих результатів фізичного моделювання з наявними в літературі залежностями для визначення інтенсивності тепловіддачі до гравітаційно-стікаючих плівок

Співвідношення для розрахунку інтенсивності тепловіддачі до стікаючих плівок

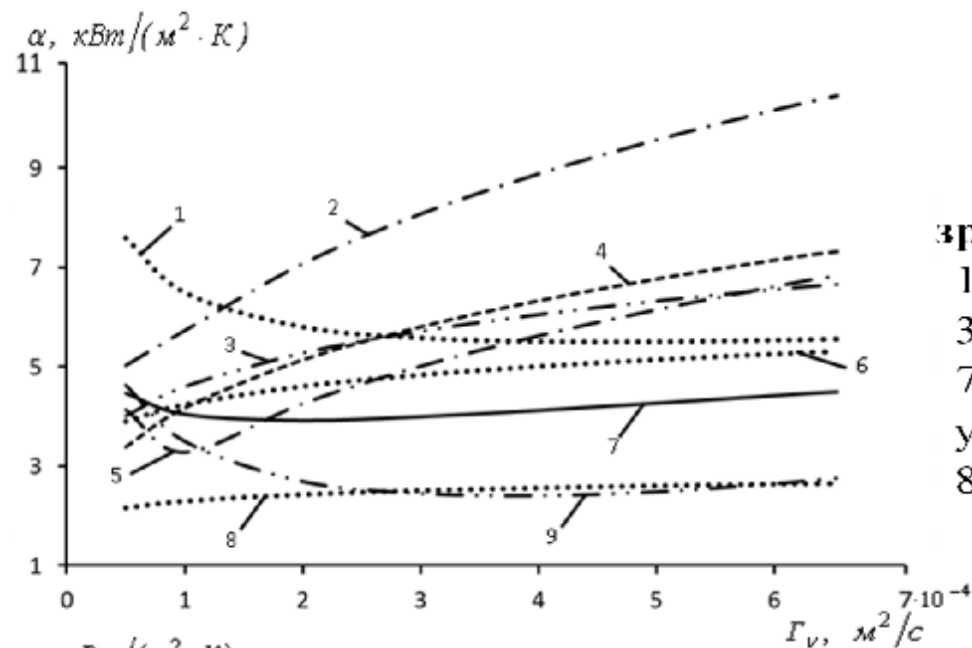


Залежність інтенсивності тепловіддачі до стікаючої плівки води від величини теплового потоку, при атмосферному тиску, $\Gamma_v = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$:

1 – розрахунок за рівнянням [4]; 2 – [64]; 3 – [73]; 4 – [34]; 5 – [52]; 6 – [74]; 7 – [75]; 8 – [61]; 9 – [57]; 10 – [68]; 11 – [93]; 12 – [7]; 13 – [50]; 14 – [67]; 15 – дані автора, розрахунок за узагальнюючим рівнянням

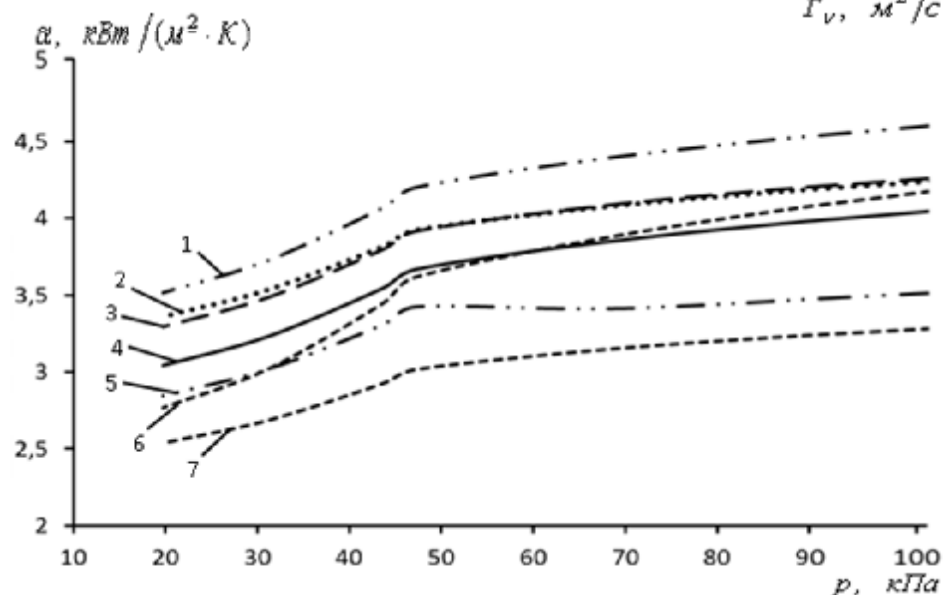
Розрахункове рівняння	Джерело
$\frac{\alpha}{\lambda} \left(\frac{v^2}{g} \right)^{1/3} = 1,1 Re^{-1/3} (1 + 0,02 Re^{0,2} + 0,9 \cdot 10^{-3} Re^{0,85} Pr^{0,65})$	[4]
$\alpha = \left[\alpha_{so}^4 + \alpha_{mo}^4 \right]^{0,625} + \left[\alpha_{sl}^4 + \alpha_{ml}^4 \right]^{0,625} \right]^{0,4}$ $\frac{\alpha_{so}}{\lambda} \left(\frac{v^2}{g} \right)^{1/3} = (3 Re)^{-1/3}; \frac{\alpha_{mo}}{\lambda} \left(\frac{v^2}{g} \right)^{1/3} = 0,013 \left(\frac{Re}{4} \right)^{1/3} \sqrt{Pr};$ $\frac{\alpha_{sl} v}{\lambda u_n^*} = \left(\frac{Re}{2} \right)^{-0,5}; \frac{\alpha_{ml} v}{\lambda u_n^*} = 0,083 Pr^{0,3} \left(\frac{Re}{4} \right)^{-0,152}$	[64]
$Nu_k = 4,29 \cdot 10^{-4} Pe_u^{0,6} Ga^{0,064} K_p^{0,77}$	[73]
$\frac{\alpha \bar{\delta}}{\lambda} = 2,6 \cdot 10^{-2} \left(\frac{\Gamma_v}{a} \right)^{0,67} Pr^{1,6 \cdot 10^{-4} (Pr-200) - 0,21}$ $\frac{\alpha l}{\lambda} = 1,9 \cdot 10^4 \left(\frac{ql}{\rho_2 a r} \right)^{0,63} \left(\frac{gl^3}{v^2} \right)^{0,1} \left(\frac{pl}{\sigma} \right)^{0,71} Re_2^{0,12}$	[34]
$Nu = \frac{\alpha \bar{\delta}}{\lambda} = 1,75 \cdot 10^{-2} \left(\frac{\bar{u} \bar{\delta}}{a} \right)^{0,75} Pr^{-0,34}$ $Nu = \frac{\alpha \bar{\delta}}{\lambda} = 7 \cdot 10^{-2} \left(\frac{\bar{u} \bar{\delta}}{a} \right)^{0,75} \left(\frac{q}{r \bar{u} \rho_2} \right)^{0,5}$	[52]
$\alpha_2 = 23,6 q^{0,527}; \alpha_2 = 8,15 q^{0,6}$	[74]
$\alpha_2 = 7,47 q^{0,6}; \alpha_2 = 20,4 q^{0,547}$	[75]
$\frac{\alpha}{\lambda} \left(\frac{v^2}{g} \right)^{1/3} = 0,9 \left(\frac{Re}{4} \right)^{-1/3}; \frac{\alpha}{\lambda} \left(\frac{v^2}{g} \right)^{1/3} = 0,176 \left(\frac{Re}{4} \right)^{0,196} - \frac{0,844}{Pr + 2,95}$ $\frac{\alpha}{\lambda} \left(\frac{v^2}{g} \right)^{1/3} = 0,152 - \frac{0,778}{Pr + 5,47}$	[61]
$Nu_u = 1,2 \cdot 10^{-2} Re_{u,3}^{0,3} Pr_{u,3}^{0,34}$	[57]
$Nu_k = 3,39 \cdot 10^{-4} Pe_u^{0,54} Ga^{0,125} K_p^{0,7}$	[68]
$\alpha_2 = 10,95 q^{0,32} \Gamma^{0,435}$	[93]
$Nu = \left[1 - 0,72 \exp \left(-13,7 \frac{x}{Pe \bar{\delta}} \right) \right]^{-1} \left[1 + 1,9 \cdot 10^{-7} Re^{1,7} \right] \left[1 + 0,05 \left(\frac{q - q_b}{q_b} \right)^{1,36} \right]$	[7]
$\alpha_2 = \left(\frac{4}{3} \right)^{1/3} \left(\frac{\lambda^3 g}{v^2} \right)^{1/3} \left(\frac{4 \Gamma}{\mu} \right)^{-1/3}; \alpha_2 = 3,8 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\lambda^3 g}{v^2} \right)^{1/3} \left(\frac{4 \Gamma}{\mu} \right)^{0,4} \left(\frac{v}{a} \right)^{0,65}$	[50]
$\alpha_2 = 7,53 \cdot 10^3 q^{-0,05} \Gamma_v^{0,08} p^{0,33}$ $Nu = 0,626 Re_u^{-0,05} Re^{-0,1} Pe^{-0,26}; Nu = 0,0626 Re_u^{-0,05} Re^{0,2} Pe^{-0,26}$	[67]

Порівняння отриманих результатів фізичного моделювання з наявними в літературі залежностями для визначення інтенсивності тепловіддачі до гравітаційно-стікаючих плівок



Залежність інтенсивності тепловіддачі до стікаючої плівки води від об'ємної щільності зрощення при атмосферному тиску, при $\Delta t = 2$ °C:

- 1 – розрахунок за рівнянням [4]; 2 – [64];
- 3 – [52]; 4 – [57]; 5 – [50]; 6 – [34];
- 7 – дані автора, розрахунок за узагальнюючим рівнянням;
- 8 – [67]; 9 – [7]



Залежність інтенсивності тепловіддачі до стікаючої плівки води від тиску вторинної пари, при $\Delta t = 4$ °C, $\Gamma_v = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м²/с:

- 1 – розрахунок за рівнянням [52]; 2 – [34];
- 3 – [61]; 4 – дані автора, розрахунок за узагальнюючим рівнянням; 5 – [7]; 6 – [57];
- 7 – [50]

1. З теоретичного аналізу процесів перенесення в концентрованих плівках встановлено, що навіть у ламінарному режимі руху плівки механізм вирівнювання концентрації поперек плівки не може обмежуватися лише молекулярною дифузією.
2. Розроблені методологічні принципи аналізу теплообмінних процесів в режимі випаровування з вільної поверхні плівок на основі модифікації моделі турбулентності з параболічним профілем турбулентної в'язкості за межами ламінарного шару, введенням корелюючої функції, що встановлює відповідність розрахункових та дослідних даних з теплообміну.
8. Виконано узагальнення результатів досліджень тепловіддачі до кільцевих низхідних потоків води та цукрових розчинів при незначному надлишковому тиску та розрідженні в режимах випаровування з вільної поверхні та бульбашкового кипіння та наведено відповідне емпіричне рівняння.
9. Виконано узагальнення результатів досліджень міжфазного гідравлічного тертя в кільцевих низхідних потоках води та цукрових розчинів при незначному надлишковому тиску та розрідженні і наведено відповідне емпіричне рівняння, яке дійсне як для адіабатних, так і діабатних потоків в трубах різних діаметрів.
10. Отримані співвідношення для розрахунку інтенсивності тепловіддачі при кипінні та випаровуванні з вільної поверхні, а також співвідношення для міжфазного гідравлічного тертя можуть бути використані в проектних та перевірних розрахунках плівкових випарних апаратів при концентруванні цукрових розчинів в усьому, з технологічних умов допустимому, діапазоні змін витратних та режимних параметрів двофазового потоку