

## ANALYSIS OF THE RESULTS OF AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE PROCESS OF VAPOR CONDENSATION ON THE SURFACE OF THE CYLINDRICAL FREE-DRAINING LIQUID JET (PART 2)

**V. Bondar, K. Solodka, S. Vasilenko, N. Ivashchenko**

*National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

*Condensation*

*Heat transfer*

*Heat and mass transfer apparatus*

*Mathematical Model*

*Hydrodynamic*

*characteristics*

---

**Article history:**

Received 17.07.2019

Received in revised form  
07.08.2019

Accepted 21.08.2019

---

**Corresponding author:**

V. Bondar

**E-mail:**

npnuht@ukr.net

---

**ABSTRACT**

The comparative analysis of the existing studies of condensation of the steam from the steam-gas mixture on a cylindrical free-flow fluid jet allows us to conclude that the majority of them are rather experimental, therefore their results are only reliable for a definite value range of the heat agent liquid and gaseous phase regime parameters. In addition, the subject of their research is the hydrodynamic regime of the continuous jet structure throughout its length.

The experimental study demonstrated that the shape of the jet flowing from the cylindrical aperture against the oncoming steam flow, is characterized by its inversion with intense wave formation on the jet surface along with jet disintegration along the flow. Accordingly, application of the existing methods for calculating heat transfer in cylindrical single jets of liquid outside the investigated parameters range to the analysis of heat transfer in jets of this type is incorrect. Since it is impossible to calculate cross-jet area and, correspondingly, the surface area of heat exchange, it is impossible to use Newton-Richman's equation. This means that it is impossible to use traditional heat emission coefficient as a parameter, therefore it is proposed to use a dimensionless complex that describes the degree of change in fluid temperature along the jet length under the relevant geometric conditions.

Based on the theory of similarity methods, several systems of dimensionless complexes have been formed, which would describe the results of experimental research quite sufficiently. The approximation of the experimental study results was carried out in the corresponding systems using the regression analysis method as the most reliable one, which gives the best correlation indexes.

## **АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КОНДЕНСАЦІЇ ПАРИ НА ПОВЕРХНІ ЦИЛІНДРИЧНОГО ВІЛЬНОСТІКАЮЧОГО СТРУМЕНЯ РІДИНИ (ЧАСТИНА 2)**

**В. І. Бондар, К. М. Солодка, С. М. Василенко, Н. В. Іващенко**

*Національний університет харчових технологій*

*Порівняльний аналіз існуючих досліджень процесу конденсації пари з парогазової суміші на циліндричному вільновитікаючому струмені рідини дав змогу зробити висновок про те, що переважна їх більшість має експериментальний характер, тому результати є достовірними тільки для відповідного діапазону зміни режимних параметрів рідкої та газоподібної фази теплоносіїв. До того ж предметом дослідження в них є гідродинамічний режим суцільної структури струменя по всій його довжині.*

*Під час проведення експериментального дослідження встановлено, що форма струменя, який витікає з циліндричного отвору протитечією до набігаючого парового потоку, характеризується його інверсією з інтенсивним хвилеутворенням на поверхні струменя при одночасному розпаді струменя вздовж течії. Відповідно, застосування до аналізу теплообміну в струменях цього типу існуючих методик розрахунку теплоперенесення в циліндричних поодиноких струменях рідини поза межами дослідженого діапазону параметрів є некоректним через велику складність обчислення площі поперечного перерізу струменя і площу поверхні теплообміну, тому використання рівняння Ньютона-Ріхмана неможливе. Тобто відсутня можливість як параметр використовувати традиційне поняття коефіцієнта тепловіддачі. Пропонується розробити безрозмірнісний комплекс, який описує ступінь зміни температури рідини вздовж довжини струменя за відповідних геометричних умов.*

*На основі методів теорії подібності сформовано декілька систем безрозмірнісних комплексів, які б достатньо повно описували результати експериментального дослідження. Апроксимація результатів експериментального дослідження проведена у відповідних системах з використанням методів регресійного аналізу як найбільш достовірна обрана методика, що дає найкращі показники кореляції.*

**Ключові слова:** конденсація, теплообмін, тепломасообмінні апарати, математична модель, гідродинамічні характеристики.

**Постановка проблеми.** Струмінь рідини, що вільно витікає з циліндричного отвору, має складну та змінну по висоті конфігурацію з інверсією на виході з отвору. До того ж струмінь, що постійно коливається, в широкому діапазоні зміни параметрів парорідинної течії розпадається. Тому аналіз процесу теплообміну, інтенсивність якого одночасно залежить від площі поверхні струменя, механізму перенесення енергії в ньому та різниці температур, є складним, а його результати неоднозначними.

Дійсно, порівняльний аналіз результатів дослідження теплообміну в струменах цього типу, проведених авторами методик, що традиційно використовуються під час розрахунку теплоперенесення в циліндричних струменах рідини, засвідчив, що розрахунок за ними поза межами відповідного діапазону параметрів течії є некоректним.

**Мета дослідження:** аналітично-експериментальним шляхом отримати методику розрахунку інтенсивності теплообміну під час конденсації пари на поверхні циліндричного вільновитікаючого струменя рідини.

**Викладення основних результатів дослідження.** Аналіз результатів експериментального дослідження процесів теплообміну під час конденсації пари на циліндричному вільновитікаючому струмені рідини, проведеного на кафедрі теплоенергетики та холодильної техніки Національного університету харчових технологій, та математично-статистичного оброблення дослідних даних, наведених в [1], дає змогу зробити висновок, що використання існуючих моделей для узагальнення результатів проведеного експерименту є некоректним. Тобто на сьогодні відсутня методика, яка б достовірно описувала процеси теплообміну під час конденсації пари на циліндричному вільновитікаючому струмені рідини для тих режимів руху водяної пари та води, в межах яких було проведено експеримент.

Як найбільш дієвий метод визначення адекватної системи безрозмірних комплексів пропонується використовувати статистичні методи аналізу результатів досліджень, зокрема методи регресійного аналізу. Тобто відповідно до запропонованого методу з використанням теорії подібності розробляється кілька систем безрозмірних комплексів, після чого, використовуючи методи регресійного аналізу, результати експериментального дослідження представляють у відповідних системах та апроксимують. Як результуючу обирають ту залежність, яка дає найкращі показники кореляції.

На жаль, використати рівняння Ньютона-Ріхмана для того, щоб обчислити площу поперечного перерізу струменя, а, відповідно до цього, і площу поверхні теплообміну, неможливо. А це означає, що неможливо як параметр використовувати традиційне поняття коефіцієнта тепловіддачі, тому пропонується використовувати безрозмірний комплекс, який описує ступінь зміни температури рідини вздовж довжини струменя за відповідних геометричних умов:

$$4St = \frac{d_0}{y} \ln \frac{T_s - T_0}{T_s - T_p}, \quad (1)$$

де  $T_s$  — температура насичення нагрівної пари, К;  $T_p$  — поточні значення температури рідини, К.  $d_0$  — діаметр отвору, м.

Також, враховуючи попередні дослідження теплообміну під час конденсації пари на циліндричних струменах [2; 3] та використовуючи метод аналізу розмірностей, при розробці емпіричних залежностей можна використовувати таку систему безрозмірних параметрів:

$$St = f\left(\frac{l}{d_o}; We; Re; K; Pr; \bar{\mu}; \bar{\rho}; \bar{\lambda}; \bar{c}_p\right). \quad (2)$$

Під час опрацювання дослідних даних останні чотири сімплекси не враховували, оскільки фізичні властивості рідини та пари суттєво не змінювались. Критерій фазового перетворення  $K$  враховує виділення теплоти переохолодженого конденсату та гідродинамічні ефекти, пов'язані з наявністю поперечного потоку маси на поверхні розділу фаз.

Також необхідно розглянути питання про вибір визначальних параметрів, які повинні враховувати вплив характеристик пароструминних потоків, довжину струменя та фізичних характеристик фаз. За визначальну приймали початкову температуру струменя, а теплофізичні величини парового потоку визначали за температури насичення пари.

Апроксимуємо експериментальні дані за деякими із систем безрозмірних комплексів, наведених в інших джерелах [2—9]. Ефективність регресійної моделі оцінимо величиною коефіцієнта детермінації. Також зробимо вибір методу оптимізації нелінійної оцінки регресії.

Результати аналізу зведені в табл. 1, графічне зображення апроксимації експериментальних даних наведено на рис. 1—9. Вибір методу оптимізації нелінійної оцінки регресії наведено в табл. 2.

*Таблиця 1. Результати аналізу апроксимації експериментальних даних*

	Вид залежності	Отримана залежність	Коеф. детермінації
1	2	3	4
1	I. В. Васильєв [4] $\lg \frac{t_s - t_1}{t_s - t_2} = a \left( \frac{gd_0}{v_0^2} \right)^b \left( \frac{l}{d_0} \right)^c$	$\lg \frac{t_s - t_1}{t_s - t_2} = 0,002326 \left( \frac{gd_0}{v_0^2} \right)^{0,38015} \left( \frac{l}{d_0} \right)^{1,209403}$	89,418%
2	В. Ф. Єрмолов [5] $\lg \frac{t_s - t_1}{t_s - t_2} = a \frac{I}{d_0} La^b K^c Pr^d Fr^e$	$\lg \frac{t_s - t_1}{t_s - t_2} = 0,136193 \frac{I}{d_0} La^{0,11103} \times$ $\times K^{-0,0567947} Pr^{-1,02388} Fr^{-0,282604}$	92,208%
3	Г. А. Ересько [6] $\lg \frac{t_s - t_1}{t_s - t_2} = a \frac{I}{d_0} La^b K^c Pr^d Fr^e$	$\frac{t_s - t_1}{t_s - t_2} = 2,3936661 \cdot Fr^{-0,025328} \times$ $\times Pr^{-0,574804} \left( \frac{d_0}{D_0} \right)^{0,147998}$	93,652%
4	Н. С. Мочалова та ін. [7] $St = a \left( \frac{l}{d_0} \right)^b Re^c Pr^d Fr^e$	$St = 0,000017 \left( \frac{l}{d_0} \right)^{-2,09874} \times$ $\times Re^{2,124} Pr^{-3,56097} Fr^{-0,392158}$	29,768%
5	S. Benedek [8] $St_{cs} = a \left( \frac{S}{F} \right)^b K^c$	$St_{cs} = 0,000389 \left( \frac{S}{F} \right)^{0,691691} K^{-1,24928}$	2,5589%
6	I. Iciek [9] $St = a \left( \frac{I}{D} \right)^b Fr^c$	$St = 0,000305 \left( \frac{I}{D} \right)^{0,416569} Fr^{-0,150734}$	6,76224%

Продовження табл. 1

1	2	3	4
7	В. П. Ісаченко та ін. [10] $4St_{cp} = a \left( \frac{l}{d_0} \right)^b Re^{-c} K^d Pr^e \exp(k \cdot We)$	$4St_{cp} = 0,000729 \left( \frac{l}{d_0} \right)^{-0,937863} Re^{0,361564}$ $K^{1,681883} Pr^{-0,667184} \exp(-24,7160We)$	72,284%
8	В. П. Ісаченко [11] $4St_{cp} = a \left( \frac{l}{d_0} \right)^b \exp(c \cdot We)$	$4St_{cp} = 0,007575 \left( \frac{l}{d_0} \right)^{0,007477} \exp(-65,5158We)$	49,09963%
9	De Salve [12] $St = a \left( \frac{l}{d} \right)^b Re^c K^d Pr^e$	$St = 0,0000088 \left( \frac{l}{d} \right)^{-0,521065} \times$ $\times Re^{3,456316} K^{-8,23340} Pr^{-5,99641}$	37,335%
	Оптимальна $\frac{d_0}{y} \ln \frac{T_s - T_0}{T_s - T_p} = a \cdot \left( \frac{1}{d_0} \right)^b \times$ $\times Re_0^c \cdot We_{\sigma 2}^d \cdot K^e \cdot Pr^f$	$\frac{d_0}{y} \ln \frac{T_s - T_0}{T_s - T_p} = 0,000897 \left( \frac{l}{d_0} \right)^{-0,725893} \times$ $\times Re_0^{0,987728} We_{\sigma 2}^{-0,529} K^{-1,66467} Pr^{-2,21757}$	93,792%

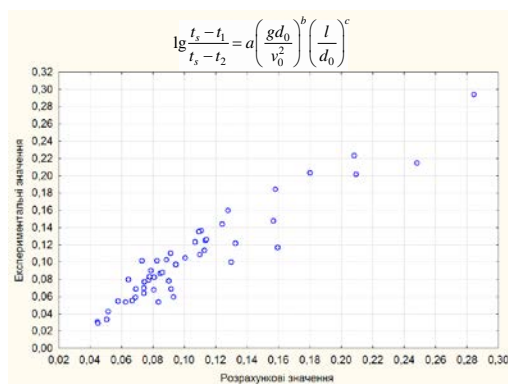


Рис. 1. Оброблення дослідних даних у системі параметрів, запропонованих у [4]

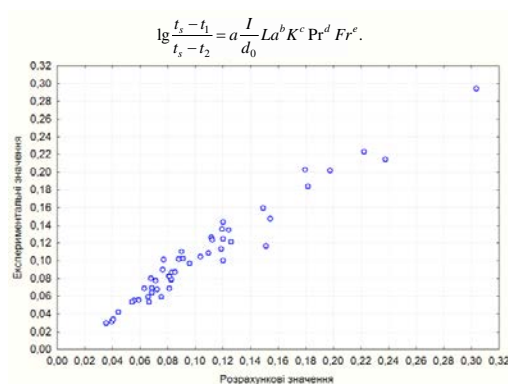


Рис. 2. Оброблення дослідних даних у системі параметрів, запропонованих у [5]

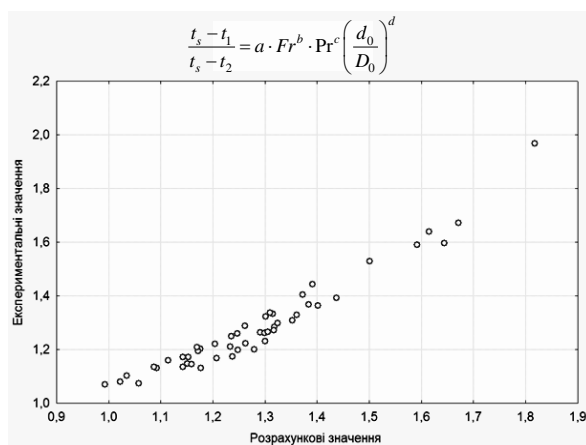


Рис. 3. Оброблення дослідних даних у системі параметрів, запропонованих у [6]

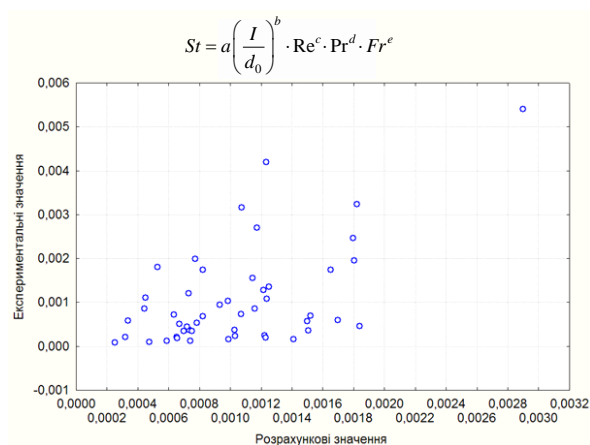


Рис. 4. Оброблення дослідних даних у системі параметрів, запропонованих у [7]

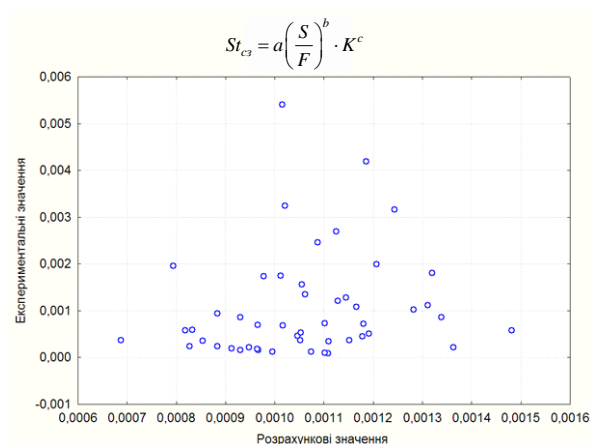


Рис. 5. Оброблення дослідних даних у системі параметрів, запропонованих у [8]

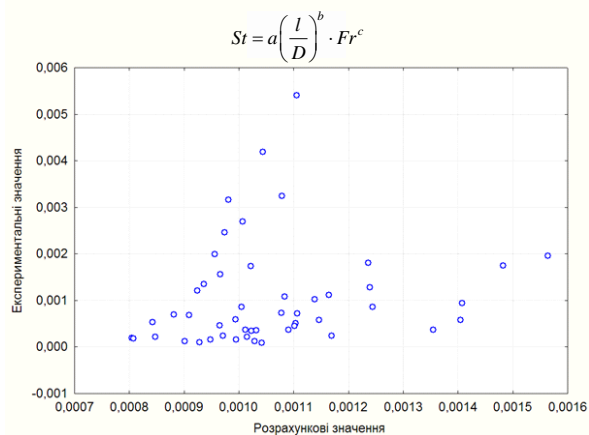


Рис. 6. Оброблення дослідних даних у системі параметрів, запропонованих у [9]

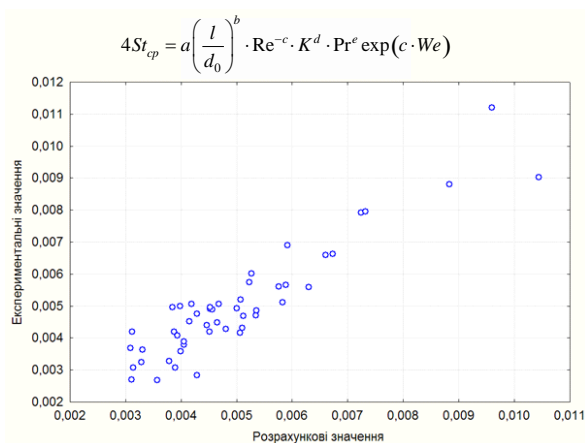


Рис. 7. Оброблення дослідних даних у системі параметрів, запропонованих у [10]

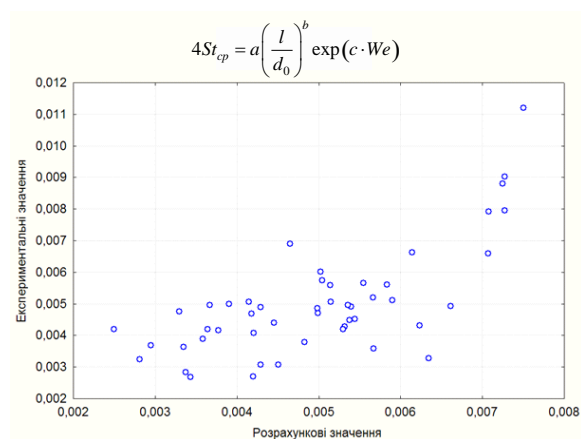


Рис. 8. Оброблення дослідних даних у системі параметрів, запропонованих в [11]

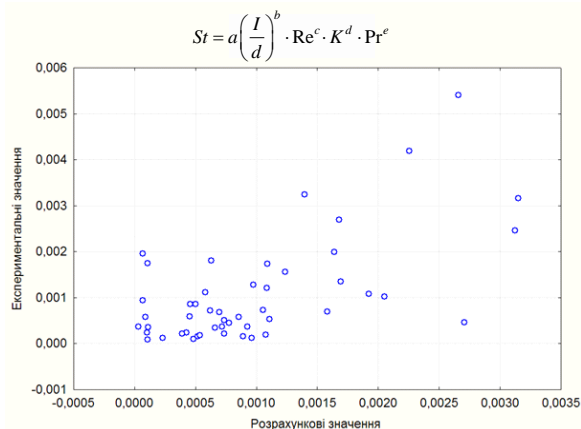


Рис. 9. Оброблення дослідних даних у системі параметрів, запропонованих у [12]

У результаті оброблення результатів експериментального дослідження в системах безрозмірних комплексів відомих досліджень, наведених вище, встановлено, що на сьогодні не існує універсальної системи параметрів, в якій можна було б з достатньою точністю описати процес теплообміну під час конденсації пари на циліндричному вільностікаючому струмені рідини. Тому розроблена оригінальна система безрозмірних чисел подібності, за якою результати експериментального дослідження апроксимовані емпіричною залежністю:

$$\frac{d_0}{y} \ln \frac{T_s - T_0}{T_s - T_p} = 0,000897 \cdot \left( \frac{1}{d_0} \right)^{0,73} \cdot \text{Re}_0^{0,99} \cdot \text{We}_{\sigma 2}^{-0,53} \cdot K^{-1,66} \cdot \text{Pr}^{-2,22}, \quad (3)$$

де  $d_0$  — діаметр струменя, м;  $l$  — довжина струменя, м;  $T_i$  — температура рідини біля поверхні поділу рідина-пара, {K};  $T_p$  — температура рідини, {K};  $T_0$  — температура рідини на зрізі розподільного пристрою, {K};  $T_s$  — температура пари в стані насичення, {K};  $y$  — поперечна координата, що відраховується від поверхні поділу фаз; відстань по вертикалі від зрізу розподільного

пристрою, м;  $\text{We}_{\sigma 2}$  — модифіковане число Вебера,  $\text{We}_{\sigma 2} = \frac{\rho_n v_0^2 d_0}{\sigma}$ ;  $\text{Re}_0$  —

число Рейнольдса струменя,  $\text{Re}_0 = \frac{v_0 d_0}{\nu_p}$ ;  $\text{Pr}$  — число Прандтля рідини,

$$\text{Pr} = \nu / a.$$

Порівняння розрахованих значень за наведеною емпіричною залежністю з експериментальними значеннями вказує на високу точність оброблення дослідних даних (рис. 10).

Під час мінімізації нормованої суми квадратів порівнювали різні оптимізаційні процедури. Найкращий результат дав квазі-ньютонівський метод з коефіцієнтом детермінації 93,8%.

Порівняння результатів використання різних оптимізаційних процедур наведено в табл. 2.



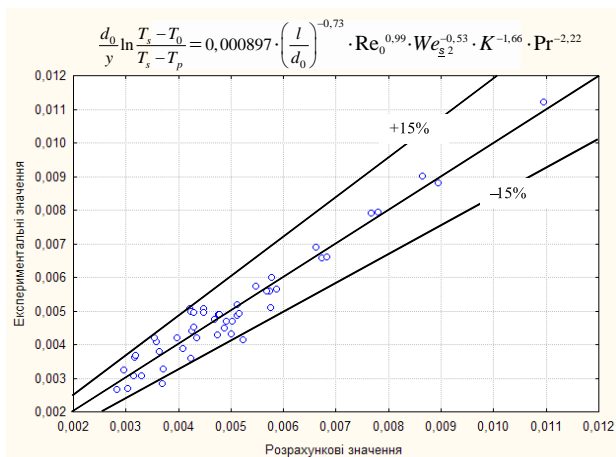


Рис. 10. Оптимальна система параметрів

Таблиця 2. Оптимізаційні процедури

Оптимізаційний метод нелінійної оцінки	Отримана залежність	Коеф. детермінації
Метод Розенброка	$\frac{d_0}{y} \ln \frac{T_s - T_0}{T_s - T_p} = 0,177104 \left(\frac{l}{d_0}\right)^{-0,738424} \times$ $\times Re_0^{0,191260} We_{\sigma 2}^{-0,131994} K^{-0,213104} Pr^{-1,64066}$	89,052%
Метод Хука-Дживіса	$\frac{d_0}{y} \ln \frac{T_s - T_0}{T_s - T_p} = 0,135691 \left(\frac{l}{d_0}\right)^{-0,821097} \times$ $\times Re_0^{0,464566} We_{\sigma 2}^{-0,244146} K^{-0,951680} Pr^{-2,19763}$	90,829%
Квазі-Ньютонівський метод	$\frac{d_0}{y} \ln \frac{T_s - T_0}{T_s - T_p} = 0,000897 \left(\frac{l}{d_0}\right)^{-0,725893} \times$ $\times Re_0^{0,987728} We_{\sigma 2}^{-0,529} K^{-1,66467} Pr^{-2,21757}$	93,792%

## Висновок

Розроблена оригінальна методика розрахунку теплообміну під час конденсації набігаючого потоку пари на поверхні струменя рідини, що вільно витікає з циліндричного отвору. Методика базується на результатах комплексного теоретичного й експериментального дослідження теплогідродинамічних режимів відповідної двофазної течії.

## Література

- Бондар В. І., Солодка К. М., Василенко С. М. Аналіз результатів експериментального дослідження процесу конденсації пари з парогазової суміші на поверхні циліндричного вільностікаючого струменя рідини (частина 1). *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 2018. Т. 24, № 1, С. 175—180.
- Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.

3. Исаченко В. П., Солодов А. П. Теплообмен при конденсации пара на сплошных и диспергированных струях жидкости. *Теплоэнергетика*. 1972. № 9. С. 24—27.
4. Зингер Н. М. О нагреве струи воды в паровом пространстве. Вопросы теплообмена при изменении агрегатного состояния вещества. М.: Госэнергоиздат. 1953. С. 81—91.
5. Ермолов В. Ф. Экспериментальное исследование тепло- и массообмена в пучке струй воды, омываемых поперечным потоком пара или паровоздушной смеси при вакууме. *Труды ЦКТИ*. 1965. Вып. 63. С. 53—63.
6. Ересько Г. А. Нагрев струй жидкости паром. *Известия вузов. Энергетика*. 1965. № 1. С. 44—46.
7. Мочалова Н. С., Холпанов Л. Н., Малюсов В. А., Жаворонков Н. М. Теплообмен при конденсации пара на турбулентных струях жидкости с учетом входного участка. *Инженерно-физический журнал*. 1983. Т. 44, № 6, С. 901—908.
8. Benedek S. Heat transfer at the condensation of steam on turbulent water jet. *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 1976. Vol. 19. P. 448—450.
9. Iciek J. The hydrodynamics of a free liquid jet and their influence on direct contact heat transfer — III. Direct contact heating of a cylindrical free falling liquid jet. *Int. J. Multiphase Flow*. 1983. Vol. 9. P. 167—179.
10. Исаченко В. П., Сотсков С. А., Якушева Е. В. Исследование теплообмена при конденсации водяного пара на турбулентных струях воды. *Труды МЭИ*. 1975. Вып. 235. С. 145—152.
11. Исаченко В. П., Солодов А. П., Самойлович Ю. З., Кушнырев В. И., Сотсков С. А. Исследование теплообмена при конденсации пара на турбулентных струях жидкости. *Теплоэнергетика*. 1971. № 2. С. 7—10.
12. Kim S. and Mills A. F. Condensation on coherent turbulent liquid jets: Part I — Experimental Study. *ASME Journal of Heat Transfer*. 1989. Vol. 111. P. 1068—1074.