

**С. Й. ТКАЧЕНКО, Н. Д. СТЕПАНОВА, О. Ю. БОЧКОВА**

### **ЗАСТОСУВАННЯ РІВНЯННЯ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТ НА ТЕРТЯ У ВЕРТИКАЛЬНОМУ ВИСОКОВ'ЯЗКОМУ ДВОФАЗНОМУ ПОТОЦІ**

**АНОТАЦІЯ** Представлено аналіз особливостей застосування рівняння збереження енергії для визначення втрат тиску на тертя при русі двофазного високов'язкого висхідного потоку у вертикальному трубопроводі. Було наведено методику обробки даних експериментальних досліджень по двофазним потокам за допомогою рівняння збереження енергії, а також висвітлено результати узагальнення експериментальних даних у вигляді апроксимуючої залежності для всього діапазону експериментальних точок. Проаналізовано причини розкиду експериментальних точок при умовному поділі усього діапазону точок на три області в залежності від значень критерію Фруда для двофазної суміші. Для обробки експериментального матеріалу було застосовано програму для статистичного аналізу даних, апроксимуючу залежність виведено із використанням методу Квазі-Ньютона. Було співставлено результати узагальнення експериментальних досліджень двофазних високов'язких потоків при використанні рівняння збереження енергії та у випадку застосування рівняння збереження кількості руху (імпульсів). Запропонована методика обробки експериментальних досліджень, а також апроксимуюча залежність для визначення втрат тиску на тертя двофазного високов'язкого потоку може бути рекомендована до застосування для розрахунку елементів теплотехнологічного обладнання.

**Ключові слова:** двофазні потоки, високов'язкі рідини, рівняння енергії, циркуляція, теплотехнологічні установки, енергоефективність, втрати на тертя, дійсний об'ємний газовміст.

**S. J. TKACHENKO, N. D. STEPANOVA, O. U. BOCHKOVA**

### **USING THE EQUATION OF ENERGY TO DETERMINE THE FRICTION LOSSES IN VERTICAL HIGH-VISCOSITY TWO-PHASE FLOW**

**ABSTRACT** There have been submitted the analysis of the specific application of the equation of conservation of energy to determine the friction losses of two-phase high-viscosity ascensional flow in a vertical pipe. The method of processing the results of the experimental data using the energy equation were presented, the results of generalization of experimental research in the form of approximating dependence for the entire range of data points have been showed also. Reasons of variation of experimental data points while the conventional division of the whole range of points in three areas depending on the values of the criteria Froude of two-phase high-viscosity flow have been analysed. The program for statistical data analysis have been used for processing the results of the experimental data, the approximating dependence have been derived with the application of Quasi-Newton method. There were compared the results of experimental generalization researches of two-phase high-viscosity flows in the case of using the equation of conservation of energy and in the case of using the equation of conservation of momentum (impulse). The technique of experimental research, and approximating dependence for determining pressure loss due to friction two-phase high-flow can be recommended for application to calculate the elements of thermal technological equipment.

**Key words:** two-phase flows, high-viscosity, energy equation, circulation, thermal heating installation, energy efficiency, friction losses, actual volume gas-content.

#### **Вступ**

На сьогодні в більшій мірі досліджена гідродинаміка пароводяних потоків для умов великої енергетики. Наприклад, нормативний метод [1], що складений для котельних агрегатів з тиском більше 1 МПа (10 кгс/см<sup>2</sup>) і обігріваними трубами з внутрішнім діаметром від 10 до 150 мм, узагальнює значний об'єм експериментальних, теоретичних і числових досліджень пароводяних потоків у всій області параметрів роботи котлоагрегатів.

Проте не в повній мірі вирішена проблема стосовно обладнання в теплотехнологічних системах, де рідинна фаза є в'язкою і високов'язкою. Враховуючи те, що в апаратах біо- і теплотехнологічних систем реалізуються двофазні потоками з високов'язкими і в'язкими

рідинами, потреба в дослідженні таких потоків є досить актуальною.

Відомо, що втрати тиску у вертикальному двофазному потоці складаються із трьох складових: втрат на тертя, на прискорення і гравітаційних втрат тиску. Відносна величина їх залежить від того, яке із рівнянь – рівняння збереження енергії, кількості руху (імпульсу) або рівняння гомогенного потоку, покладено в основу обробки даних по двофазним вертикальним потокам. Рівняння гомогенного потоку менш точно, ніж два інших, описує експериментальні дані в широкому діапазоні умов.

За умов аналізу інформації по втратах тиску у трубопроводі з двофазними вертикальними потоком виявляється, що більша частина з обробки експериментальних досліджень базується на рівнянні збереження імпульсу. В [2] досліджено і узагальнено закономірності течії високов'язких

двофазних течій: у вертикальних трубах і кільцевих каналах з еквівалентним діаметром  $6,1 \leq D_{\text{екв}} \leq 500$  мм при  $P = 0,055-0,131$  МПа, в'язкість рідкої фази змінюється в 130 разів.

Аналізуючи складові рівнянь збереження енергії та імпульсів можна прийти до висновку, що: у всіх рівняннях складова втрат на тертя повинна визначатись емпіричним або напівемпіричним шляхом; складова втрат на прискорення потребує емпіричного визначення дійсного об'ємного газовмісту  $j$ ; нівелірна складова потребує емпіричного визначення лише у рівнянні збереження імпульсів [3].

Складова, яка обумовлена тертям, у рівнянні енергії є необоротною, отже вона завжди додатна. Однак всі інші складові в рівняннях збереження енергії та імпульсу можуть мати будь-які знаки.

Частина дотичного напруження на стінці стає від'ємною, в той час як основний потік направлений вгору. Жодне із співвідношень, що базується на рівнянні збереження імпульсу, не дає від'ємного дотичного напруження на стінці. Деякі дослідники стверджують, що при аналізі падіння тиску у вертикальному каналі рівняння збереження енергії має переваги над рівнянням імпульсів, інші вважають навпаки [4].

В даному випадку досліджуються високов'язкі двофазні потоки і, отже, прийнято за доцільне дослідити цю проблему із застосуванням рівняння збереження енергії з метою подальшого вдосконалення математичного моделювання гідродинамічних процесів в теплотехнологічному обладнанні.

### Мета роботи

Підвищення енергетичної та екологічної ефективності теплотехнологічних, хіміко-технологічних установок за рахунок удосконалення математичних моделей в'язких і високов'язких двофазних потоків, які реалізуються в елементах цих установок.

### Експериментальні дослідження двофазних потоків

За основу досліджень для визначення втрат тиску двофазного високов'язкого потоку із застосуванням рівняння енергії були використані результати [2], де експериментальним шляхом визначено складові втрат тиску на основі рівняння імпульсів, крім того отримані залежності для визначення дійсних параметрів потоку. Дослідження проводились на вертикальній експериментальній установці, де довжина стабілізаційної ділянки  $l_{\text{ст}} = 1,5$  м, довжина експериментальної ділянки  $l_{\text{тр}} = 2,033$  м, внутрішній діаметр труби –  $D = 0,0327$  м.

Експериментальний стенд являє собою контур, де здійснюється природня циркуляція. В контурі є опускна і підйомна ділянки, сепараційний пристрій. Змішування рідини з газом відбувається на нижній ділянці. В процесі проведення досліджень заміряються об'ємні витрати рідини  $V_1$ , повітря  $V_2$ , температури суміші  $t_c = 30$  °С, загальний перепад тиску на експериментальній ділянці  $\Delta P$ . Досліджуванним потоком є суміш цукрового розчину з концентрацією сухих речовин  $CP = 51,5$  %,  $62$  % і  $68,7$  % та повітря. Для визначення газовмісту  $j$  у вертикальних трубах використовується метод відсічки двофазного потоку швидкозапірними клапанами (час перекриття  $t = 0,015$  с). Після відсічки заміряється об'єм рідини і повітря. Експериментальна ділянка на стенді є змінною. Коли з метою визначення  $j$  відбувалась відсічка потоку, тоді встановлювалась металева трубка. А на час візуального спостереження режимів двофазної течії металева трубка замінювалась на скляну з таким же внутрішнім діаметром.

### Методика обробки результатів експериментальних досліджень

Методика обробки експериментальних досліджень із застосуванням рівняння енергії для визначення співвідношень складових перепаду тиску на тертя у двофазному вертикальному потоці наведена нижче у вигляді залежностей (1)–(14).

Рівняння балансу збереження енергії представлено у такому одномірному вигляді [4]

$$-\frac{dP}{dz} = r_{\text{н}} \frac{dF}{dz} + \frac{1}{2} r_{\text{н}} (r_1 W_0)^2 + \frac{d}{dz} \left( \frac{\dot{e}}{\dot{e}} \frac{x^3}{2r_2^2} + \frac{(1-x)^3}{(1-j)^2 r_1^2} \dot{u} + r_{\text{н}} g \right), \quad (1)$$

де  $dP/dz$  – градієнт тиску, а три складові в правій частині рівняння – складові градієнту тиску на тертя  $\Delta P_{\text{тр}}$ ; на прискорення  $\Delta P_{\text{приск}}$  і нівелірна (вагова) складова градієнту тиску  $\Delta P_{\text{ваг}}$ ;  $\rho_1$  – густина рідинної фази,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\rho_2$  – густина газової фази,  $\text{кг/м}^3$ ;  $g$  – прискорення вільного падіння,  $\text{м/с}^2$ ;  $\rho_{\text{г}}$  – гомогенна густина суміші, що визначається із рівняння,  $\text{кг/м}^3$

$$r_{\text{г}} = \frac{\dot{e}}{\dot{e}} \frac{x}{r_2} + \frac{1-x}{r_1} \frac{\dot{u}}{\dot{u}}; \quad (2)$$

$W_0$  – швидкість циркуляції двофазного потоку, яка в нашому випадку розраховувалась за формулою,  $\text{м/с}$

$$W_0 = W_{\text{г}} + W_{\text{р}} \frac{r_2}{r_1}, \quad (3)$$

де  $W_{\text{г}}$ ,  $W_{\text{р}}$  – приведені швидкості рідкої та газової фаз на початку досліджуваної ділянки,  $\text{м/с}$ .

Загальні втрати тиску у вертикальному трубопроводі при русі двофазного вертикального потоку визначається із такого рівняння, Па:

$$DP_{\text{заг.}} = DP_{\text{тр.}} + DP_{\text{приск.}} + DP_{\text{ваг.}} \quad (4)$$

Складова втрат тиску на тертя двофазного потоку визначалась із рівняння (4)

$$DP_{\text{тр.}} = DP_{\text{заг.}} - DP_{\text{приск.}} - DP_{\text{ваг.}} \quad (5)$$

Загальна складова втрат тиску у вертикальному двофазному висхідному потоці при проведенні досліджень  $\Delta P_{\text{заг.}}$  вимірюється безпосередньо на експериментальній ділянці.

Значення втрати тиску на прискорення двофазного потоку шукаємо у рівнянні, Па

$$DP_{\text{приск.}} = \frac{\rho_1 W_0 \dot{u}^2}{\xi} \cdot \left[ \frac{x^3}{j_{\text{вих}}^2 \rho_{2(\text{вих})}^2} + \frac{(1-x)^3}{(1-j_{\text{вих}})^2 (\rho_{2(\text{вих})})^2} - \frac{x^3}{j_{\text{вх}}^2 \rho_{1(\text{вх})}^2} + \frac{(1-x)^3}{(1-j_{\text{вх}})^2 (\rho_{1(\text{вх})})^2} \right] \dot{u} \quad (6)$$

де  $\rho_{1(\text{вх})}$ ,  $\rho_{2(\text{вих})}$  – густина рідини на вході в дослідну ділянку і густина повітря на виході з ділянки, кг/м<sup>3</sup>;  $j_{\text{вх}}$ ,  $j_{\text{вих}}$  – дійсний об’ємний газовміст на вході і виході з експериментальної ділянки труби, який визначався за допомогою такої залежності для в’язких і високов’язких потоків при низьких тисках і вакуумі [5, 6]

$$j = 0,5 \frac{\xi}{\xi} \frac{W_c}{0,35 S r_0 \sqrt{gD} + S r W_c} + 1 \frac{\dot{u}}{\dot{u}} - \frac{\xi}{\xi} \frac{W_c}{0,35 S r_0 \sqrt{gD} + S r W_c} + 1 \frac{\dot{u}^2}{\dot{u}^2} - \frac{\xi}{\xi} \frac{W_c}{0,35 S r_0 \sqrt{gD} + S r W_c} + 1 \frac{\dot{u}^{0,5}}{\dot{u}^{0,5}} \quad (7)$$

де  $W_c$  – витратна швидкість суміші, м/с.

Параметри ковзання фаз  $Sr$ ,  $Sr_0$  на вході і на виході з труби визначаються в залежності від значення критерію Галілея, який розраховується за рівнянням

$$Ga = \frac{gD^3}{u_1^2} \quad (8)$$

При  $Ga^{1/3} < 800$  параметр  $Sr_0$  визначається з рівняння

$$Sr_0 = 0,123 r^{0,05} \frac{\xi}{\xi} \frac{1}{D^*} \frac{\dot{u}^{0,25}}{\xi} \frac{D^*}{\xi (u_1^2/g)^{0,6}} \quad (9)$$

де  $D^*$  – лінійний розмір експериментальної ділянки, для круглої труби  $D^* = D$ ;  $r = \rho_1/\rho_2$  – відносна густина.

При значенні  $Ga^{1/3} > 800$  параметр ковзання фаз  $Sr_0$

$$Sr_0 = 0,65 r^{0,05} \frac{\xi}{\xi} \frac{1}{D^*} \frac{\dot{u}^{0,25}}{\xi} \quad (10)$$

При  $Ga^{1/3} < 800$  параметр  $Sr$

$$Sr = 1,85 r^{0,05} \frac{\xi}{\xi} \frac{1}{D^*} \frac{\dot{u}^{-0,04}}{\xi} \frac{D^*}{\xi (u_1^2/g)^{0,6}} \frac{\dot{u}^{-0,125}}{\xi} \quad (11)$$

При  $Ga^{1/3} > 800$  параметр  $Sr$

$$Sr = 0,8 r^{0,05} \frac{\xi}{\xi} \frac{1}{D^*} \frac{\dot{u}^{-0,04}}{\xi} \quad (12)$$

Витратний масовий паровміст  $x$  визначається з рівняння

$$x = \frac{W_{\text{ф2}}}{W_{\text{ф2}} + W_{\text{ф1}}} \quad (13)$$

Нівелірна (вагова) складова втрат тиску, Па

$$DP_{\text{ваг.}} = r_{\text{н}} g l_{\text{тр}} \quad (14)$$

При аналізі вищенаведеної методики обробки видно, що загальні втрати тиску на ділянці визначаються безпосередньо приладами на експериментальному стенді, вагова складова втрат визначається розрахунково з врахуванням витратних параметрів і геометричного розміру стенду, втрати на прискорення – із застосуванням витратних (швидкість циркуляції, масовий паровміст, густина рідинної і газової фаз) і дійсних параметрів двофазного потоку (дійсний об’ємний газовміст) [7].

### Результати узагальнення експериментальних досліджень із застосуванням рівняння збереження енергії

За основу для досліджень було взято експериментальний матеріал, приведений вище, де дослідна установка максимально наближена до реальних умов, а експериментальна ділянка – до натурної труби, що має місце в теплообмінних апаратах теплотехнологічних і біотехнологічних систем.

Враховуючи те, що експериментальний матеріал відповідає низькому тиску, визначення втрат тиску на тертя у вертикальному двофазному потоці  $\Delta P_{\text{тр.}}$  шукаємо у залежності, Па

$$DP_{\text{тр.}} = DP_0 \frac{\xi}{\xi} + Y \frac{W_{\text{ф1}}}{W_0 \dot{u}} \quad (15)$$

Втрати тиску на тертя у вертикальному однофазному потоці  $\Delta P_0$  визначаємо з рівняння

$$DP_0 = \frac{\lambda l_{\text{тр}}}{D} \frac{\xi}{\xi} \frac{1}{2} \frac{W_{\text{ф0}}^2}{\dot{u}^2} \quad (16)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт тертя у вертикальному висхідному однофазному потоці, що визначається в залежності від режиму руху потоку в трубопроводі.

Експериментальне значення поправки на двофазність  $Y$  розраховуємо за допомогою залежності

$$Y = \frac{\frac{\rho}{\rho_0} \frac{DP_{тр.}}{DP_0} - 1}{\frac{\rho}{\rho_0} \frac{W_0}{W_0}} \cdot \frac{\rho}{\rho_0} \frac{D}{D_0} \quad (17)$$

Приймаємо, що коефіцієнт поправки на двофазність  $Y$  описується такими безрозмірними визначаючими параметрами  $Y = f(r_2/r_1, Re_1, \eta/m_2, Fr_0, Fr_c)$ .

В процесі обробки даного матеріалу було використано програму для статистичного аналізу даних – *Statistica 7*. В результаті її застосування було використано метод Квазі-Ньютона і отримано апроксимуючу залежність для всього діапазону експериментальних точок з коефіцієнтом детермінації  $R^2 = 0,976$  у такому вигляді

$$Y_{розр.} = 91,6 Fr_0^{-0,26} Fr_c^{-0,43} \cdot \left( \frac{\rho}{\rho_0} \frac{D}{D_0} \right)^{0,15} \left( \frac{\eta}{\eta_0} \frac{\rho}{\rho_0} \right)^{-0,12} Re_1^{-0,08} \quad (18)$$

де  $\eta$  – динамічна в'язкість рідинної фази;  $\rho$  – динамічна в'язкість газової фази.

Критерій Фруда  $Fr_0$  визначається з рівняння

$$Fr_0 = \frac{W_0^2}{gD} \quad (19)$$

Критерій Рейнольдса для рідини

$$Re_1 = \frac{W_0 D}{\nu_1} \quad (20)$$

де  $\nu_1$  – кінематична в'язкість рідини,  $m^2/s$ .

Критерій Фруда суміші  $Fr_c$  визначаємо із залежності

$$Fr_c = \frac{W_c^2}{gD} \quad (21)$$

Отже, згідно з формулами (17) і (18) отримано таке рівняння

$$\frac{\frac{\rho}{\rho_0} \frac{DP_{тр.}}{DP_0} - 1}{\frac{\rho}{\rho_0} \frac{W_0}{W_0}} \cdot \frac{\rho}{\rho_0} \frac{D}{D_0} = 91,6 Fr_0^{-0,26} Fr_c^{-0,43} \cdot \left( \frac{\rho}{\rho_0} \frac{D}{D_0} \right)^{0,15} \left( \frac{\eta}{\eta_0} \frac{\rho}{\rho_0} \right)^{-0,12} Re_1^{-0,08} \quad (22)$$

Узагальнення (18) відповідає значенням безрозмірних параметрів в такому діапазоні:  $Fr_0 = 0,05-5,4$ ;  $Fr_c = 9-2900$ ;  $r_2/r_1 = 0,99-1,23$ ;  $\eta/m_2 \leq 130$ ;  $Re_1 = 38-5047$ .

Результати узагальнення експериментальних даних в усьому діапазоні за допомогою програми *Statistica 7* з формули (18) представлені на рис. 1 у вигляді (23):

$$B^0 \frac{Y_{розр.}}{Fr_0^{-0,3} \left( \frac{\rho}{\rho_0} \frac{D}{D_0} \right)^{0,15} \left( \frac{\eta}{\eta_0} \frac{\rho}{\rho_0} \right)^{-0,12} Re_1^{-0,08}} = f(Fr_c) \quad (23)$$

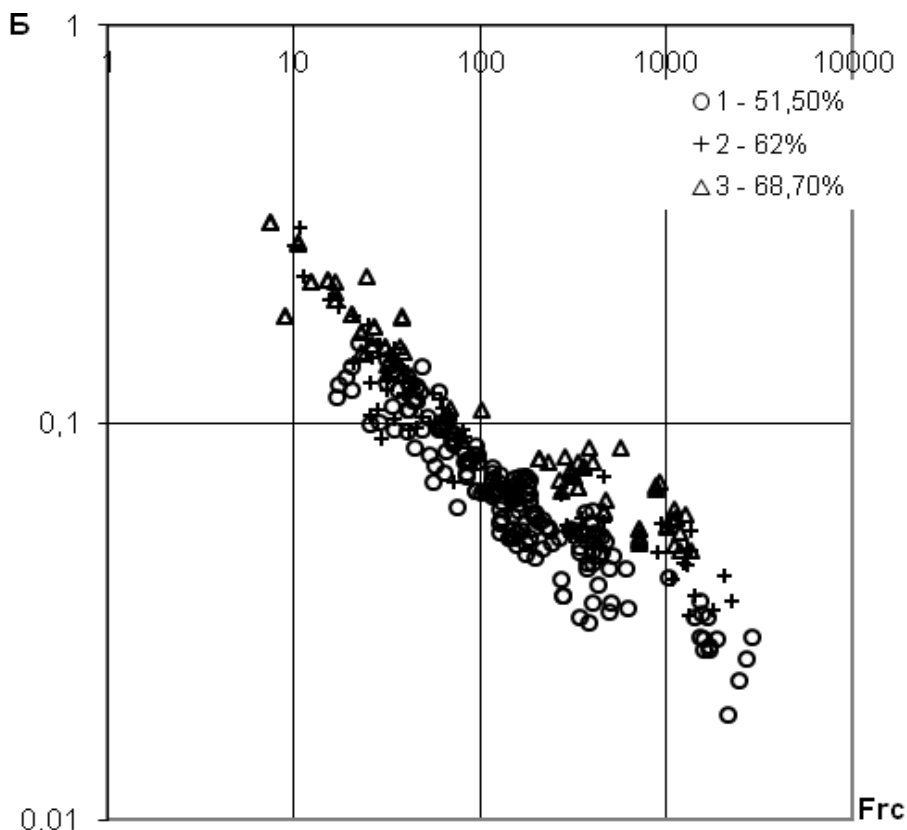


Рис. 1 – Суміш цукровий розчин+повітря: 1-CP=51,5 %, 2-62 %, 3-68,7 %

В результаті аналізу рис. 1 виділено три області: перша область при значеннях критерію Фруда суміші  $Fr_c \leq 300$  (швидкість суміші  $W_c \leq 10,4$  м/с); друга – при  $300 < Fr_c \leq 750$  ( $10,4$  м/с  $< W_c \leq 15,5$  м/с); третя – при  $Fr_c > 750$  ( $W_c > 15,5$  м/с).

В другій області при  $300 < Fr_c \leq 750$  на дослідній ділянці експериментального стенду реалізується снарядний режим. В цій області зі збільшенням довжини снарядів розвиваються пульсації потоку. В цій же області збільшується розкид експериментальних точок (рис. 1), відповідно величина коефіцієнту детермінації  $R^2$  зменшується, що і показала додаткова статистична обробка експериментальних даних в цій області.

Обробка експериментальних результатів статичними методами при  $Fr_c \leq 300$  дозволила отримати залежність у вигляді  $Y = f(r_2/r_1, Re_1, \eta/\eta_2, Fr_c, Fr_c)$  з коефіцієнтом детермінації  $R^2 = 0,982$ . Дана область викликає практичний інтерес за умов розробки ерліфтных теплообмінників в системі біогазових установок.

### Висновки

Узагальнено експериментальні результати по визначенню втрат тиску на тертя високов'язких вертикальних двофазних потоків з використанням рівняння балансу енергії для умов експлуатації теплотехнологічного обладнання.

Це дозволило виділити три області: перша область при значеннях критерію Фруда суміші  $Fr_c \leq 300$  (швидкість суміші  $W_c \leq 10,4$  м/с); друга – при  $300 < Fr_c \leq 750$  ( $10,4$  м/с  $< W_c \leq 15,5$  м/с); третя – при  $Fr_c > 750$  ( $W_c > 15,5$  м/с). Область експериментальних точок при  $Fr_c \leq 300$ , де снарядний режим знаходиться в стадії зародження, описується залежністю з такими параметрами  $Y = f(r_2/r_1, Re_1, \eta/\eta_2, Fr_c, Fr_c)$ , при цьому коефіцієнт детермінації  $R^2 = 0,982$ . В діапазоні  $300 < Fr_c \leq 750$  довжина повітряних снарядів зростає, що призводить до збільшення розкиду точок і зменшення значення коефіцієнту детермінації за умов статистичного опису процесів.

Узагальнено увесь діапазон експериментальних точок при значеннях критерію Фруда суміші  $Fr_c = 9-2900$ , отримано залежність з коефіцієнтом детермінації  $R^2 = 0,976$ .

Отримані результати обробки експериментальних даних двофазних високов'язких потоків на основі рівняння збереження енергії можуть застосовуватись для розрахунку при розробці елементів біотехнологічного і теплотехнологічного обладнання, де реалізуються високов'язкі двофазні течії.

### Список літератури

- 1 **Балдина, О. М.** Гидравлический расчёт котельных агрегатов (нормативный метод) [Текст] / **О. М. Балдина, А. В. Локшин, Д. Ф. Петерсон.** – М. : Энергия, 1978. – 256 с.
- 2 **Ткаченко, С. Й.** Обобщённые методы расчёта теплогидродинамических процессов и применение их для оптимизации выпарных установок [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. : 05.14.04 «Промышленная теплоэнергетика» / **Ткаченко Станислав Иосифович.** – Москва, 1988. – 39 с.
- 3 **Ткаченко, С. Й.** Самозакипающие потоки в дренажных каналах теплотехнологических систем систем [Текст] : монография / **С. Й. Ткаченко, Н. Д. Степанова.** – Винница : Универсум-Винница, 2008. – 160 с. – ISBN 978-966-641-274-7.
- 4 **Баттерворс, Д.** Теплопередача в двухфазном потоке [Текст] : пер. с англ. / **Д. Баттерворс, Г. Хьюитт.** – М. : Энергия, 1980. – 328 с.
- 5 **Федоткин, И. М.** Теплогидродинамические процессы в выпарных аппаратах [Текст] / **И. М. Федоткин, С. Й. Ткаченко.** – Киев : Техника. – 1975. – 212 с.
- 6 **Ткаченко, С. Й.** Багатокомпонентний самозакипающий потік в елементах випарника миттєвого скипання / **С. Й. Ткаченко, Н. Д. Степанова, О. Ю. Бочкова** // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 4. – С. 90–93. – ISSN1997-9266.
- 7 **Shiu, B. R.** Application of Preconditioning Method to Gas Liquid Two-phase Flow Computations / **B. R. Shiu, S. Yamamoto, X. Yuan** // Transaction of the ASME. Journal of Fluids Engineering. – 2004. – Vol. 126, № 10. – P. 606–612.

### Bibliography (transliterated)

- 1 **Baldina, O. M., Lokshin, A. V. and Peterson D. F.** (1978), *Gidravlicheskiy raschjot kotel'nyh agregatov (normativnyj metod)* [Hydraulic calculation of boiler units (standard method)], Jenergiya [Energy], Moscow, Russia. – 256 p.
- 2 **Tkachenko, S. J.** (1988), "Obobshhennyye metody raschjota teplogidrodinamicheskikh processov i primeneniye ih dlja optimizacii vyparnykh ustanovok: avtoreferat [Generalized methods for calculating heat hydrodynamic processes and their application to optimize the evaporators]", Abstract of D. Sc. dissertation, Technical thermal power engineering, Moscow energy university, Moscow, Russia.
- 3 **Tkachenko, S. J. and Stepanova, N. D.** (2008), *Samozakipajuchi potoki v drenazhnykh kanalah teplotehnologichnykh sistem* [Self-boiling flows in draining pipes of thermal-power technology systems], Univerzum-Vinnycja, Vinnycja, – ISBN 978-966-641-274-7.
- 4 **Battervors, D. and H'juitt G.** (1980), *Teploperedacha v dvuhfaznom potoke* [Heat transfer in the two-phase flow], Jenergiya, [Energy], Moscow, Russia.
- 5 **Fedotkin, I. M. and Tkachenko, S. J.** (1975), *Teplogidrodinamicheskie processy v vyparnykh aparatah* [Thermal Hydrodynamic processes in evaporators], Tehnika [Technique], Kyiv, Ukraine.
- 6 **Tkachenko, S. Y., Stepanova, N. D. and Bochkova, O. Yu.** (2011), "Bahatokomponentnyy samozakypayuchyuy potok v elementakh vyparnykh myt'yevoho skypannya [Multi-component self-boiling flow in elements of instant-

- boiling evaporators”], *Visnyk VPI [VPI Announcer]*, no. 4, pp. 90–93, ISSN 1997-9266.
- 7 **Shiu, B. R., Yamamoto, S. and Yuan, X.** (2004), “Application of Preconditioning Method to Gas Liquid Two-phase Flow Computations”, *Transaction of the ASME. Journal of Fluids Engineering*, vol. 126, no. 10. pp. 606–612.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Ткаченко Станіслав Йосипович** – доктор технічних наук, професор, Вінницький Національний Технічний університет, завідувач кафедри теплоенергетики, м. Вінниця; тел.: (063) 502-54-43; e-mail: [Stahit@mail.ru](mailto:Stahit@mail.ru).

**Tkachenko Stanislav Josipovych** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Vinnica National Technical University, Head at the Department of Thermal Power Engineering, tel.: (063) 502-54-43; e-mail: [Stahit@mail.ru](mailto:Stahit@mail.ru)

**Степанова Наталія Дмитрівна** – кандидат технічних наук, доцент, Вінницький національний технічний університет, доцент кафедри теплоенергетики, тел.: (063) 063-49-58 e-mail: [Stepanovand@mail.ru](mailto:Stepanovand@mail.ru).

**Stepanova Nataliya Dmytrivna** - Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Vinnica National Technical University, Associate Professor at the Department of Thermal Power Engineering, tel.: (063)-063-49-58; e-mail: [Stepanovand@mail.ru](mailto:Stepanovand@mail.ru).

**Бочкова Ольга Юрійвна** – Вінницький Національний Технічний університет, аспірант кафедри теплоенергетики, тел.: (098) 628-58-97; e-mail: [Olichkab888@gmail.com](mailto:Olichkab888@gmail.com).

**Bochkova Olga Uriivna** – Vinnica National Technical University, post graduate student at the Department of Thermal Power Engineering, tel.: (098)-628-58-97; e-mail: [Olichkab888@gmail.com](mailto:Olichkab888@gmail.com).

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Ткаченко, С. Й.** Застосування рівняння енергії для визначення втрат на тертя у вертикальному високів'язкому двофазному потоці [Текст] / **С. Й. Ткаченко, Н. Д. Степанова, О. Ю. Бочкова** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 10 (1182). – С. 50–55. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.07.

*Please cite this article as:*

**Tkachenko S. J., Stepanova, N. D. and Bochkova, O. U.** (2016), “Using the equation of energy to determine the friction losses in vertical high-viscosity two-phase flow”, *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 10(1182), pp. 50–55, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.07.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Ткаченко, С. И.** Использование уравнения энергии для определения потерь на трение в вертикальном високвязком двухфазном потоке [Текст] / **С. И. Ткаченко, Н. Д. Степанова, О. Ю. Бочкова** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 10(1182). – С. 50–55. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.07.

**АННОТАЦИЯ** Представлен анализ особенностей применения уравнения сохранения энергии для определения потерь давления на трение при движении двухфазного высоковязкоговосходящего потока в вертикальном трубопроводе. Приведена методика обработки данных экспериментальных исследований по двухфазным потокам с помощью уравнения сохранения энергии, а также показаны результаты обобщения экспериментальных данных в виде аппроксимирующей зависимости для всего диапазона экспериментальных точек. Проанализированы причины разброса экспериментальных точек при условном разделении их на три области в зависимости от значений критерия Фруда для двухфазной смеси. Для обработки экспериментального материала было использовано программу для статистического анализа данных, аппроксимирующую зависимость выведено с применением метода Квази-Ньютона. Было сопоставлено результаты обобщения экспериментальных исследований двухфазных высоковязких потоков при использовании уравнения сохранения энергии и в случае применения уравнения сохранения количества движения (импульсов). Предложенная методика обработки экспериментальных исследований, а также аппроксимирующая зависимость для определения потерь на трение двухфазного высоковязкого потока может быть рекомендована к применению для расчёта элементов теплотехнологического оборудования.

**Ключевые слова:** двухфазные потоки, высоковязкие жидкости, уравнение энергии, циркуляция, теплотехнологические установки, энергоэффективность, потери на трение, действительное объемное газосодержание.

Надійшла (received) 10.01.2016