

**Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, О. П. АРСЕНЬЄВА, О. Ю. ПЕРЕВЕРТАЙЛЕНКО, С. К. КУСАКОВ,  
О. А. ВАСИЛЕНКО, П. Ю. АРСЕНЬЄВ, А. П. ЮЗБАШЬЯН**

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВІДДАЧІ ТА ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ У СТРІЧКОВО-ПОТОЧНИХ КАНАЛАХ ПАНЕЛЬНИХ ПЛАСТИНЧАСТИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ**

Приведені результати дослідження тепловіддачі та гідравлічного опору у стрічково-поточних каналах панельних пластинчастих теплообмінників. Отримані базові рівняння у критеріальній формі для розрахунку тепловіддачі та коефіцієнту гідравлічного опору одиниці довжини каналу. Описана експериментальна модель та експериментальна установка. Відмічена важлива роль пластинчато-панельних теплообмінників у рекуперації тепла викидних газів.

**Ключові слова:** рекуперація тепла; пластинчато-панельний теплообмінник; експериментальна установка; канал стрічково-поточного типу.

**Л. Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, О. П. АРСЕНЬЄВА, А. Ю. ПЕРЕВЕРТАЙЛЕНКО, С. К. КУСАКОВ,  
А. А. ВАСИЛЕНКО, П. Ю. АРСЕНЬЄВ, А. П. ЮЗБАШЬЯН**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ И ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В ЛЕНТОЧНО-ПОТОЧНЫХ КАНАЛАХ ПАНЕЛЬНЫХ ПЛАСТИНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ**

Приведены результаты исследования теплоотдачи и гидравлического сопротивления в ленточно-поточных каналах панельных пластинчатых теплообменников. Получены базовые зависимости в критериальной форме для расчета теплоотдачи и коэффициента гидравлического сопротивления единицы длины канала. Описана экспериментальная модель и экспериментальная установка. Отмечена важная роль пластинчато-панельных теплообменников в рекуперации тепла сбросных газовых потоков.

**Ключевые слова:** рекуперация тепла; пластинчато-панельный теплообменник; экспериментальная установка; канал ленточно-поточного типа.

**L. L. TOVAZHNYANSKYI, O. P. ARSENYEVA, O. YU. PEREVERTAYLENKO, S. K. KUSAKOV, O. A. VASILENKO,  
P. YU. ARSENYEV, A. P. YUZBASHYAN**

### **INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER AND PRESSURE DROP IN WAVED-FORM CHANNELS OF PANEL-PLATE HEAT EXCHANGERS**

The results of experimental investigation of heat transfer and pressure drop in waved-form channels of panel-plate heat exchangers are presented. The experimental pattern of panel-plate heat exchanger and experimental unit is described. The basic equations for film heat transfer and friction coefficient were obtained in dimensionless form. It is underlined that proposed construction of panel-plate heat exchanger is optimal for waste gaseous flows heat recuperation when another flow is liquid, for example, water flow. The original waved-form channel for gaseous flow is proposed. Such panel-plate heat exchangers will be an effective tool for use of high temperature waste heat integration in a number of processes and then for polluting emission decrease.

**Key Words:** heat recuperation; panel-plate heat exchanger; experimental unit; waved-form channel.

**Вступ.** Підвищення рівня рекуперації тепла у промисловому та муніципальному секторі є ключовим моментом у зниженні енергоспоживання за рахунок вторинних ресурсів [1]. Особливо це стосується потоків вторинних енергоресурсів, які мають високий температурний потенціал, але низькі значення теплофізичних характеристик. До таких енергоресурсів можна віднести викидні гази промислових печей, димові гази, деякі викидні парогазові суміші тощо [2].

Цим енергоресурсам притаманні такі спільні характеристики:

- великі об'ємні швидкості руху газових потоків;
- низькі значення допустимих втрат тиску на здолення гідравлічного опору теплообмінного обладнання;
- низькі значення теплофізичних властивостей (щільність, питома теплоємність), які входять до критерію Прандтля у критеріальному рівнянні тепловіддачі, тому потоки мають низькі коефіцієнти тепловіддачі;
- газові потоки часто бувають забруднені твердими частинками;

- при охолодженні таких потоків нижче точки роси має місце конденсація вологи та можливе утворення крапель сірчистої та сірчаної кислоти.

Вищезгадані викидні гази є значною частиною вторинних енергоресурсів, які можна використати, щонайменше, шляхом прямої рекуперації тепла. Для рекуперації тепла подібних потоків потрібно розробити технологію рекуперації та визначити використання рекуперованого тепла.

Теплообмінне обладнання є ключовим фактором технології рекуперації. Від його ефективної роботи залежить зниження енергоспоживання технологічних процесів.

**Аналіз останніх досягнень та постановка проблеми.** Теплообмінні апарати типу калориферів, що застосовуються зараз для рекуперації тепла викидних газових потоків, мають низку суттєвих недоліків: низьку теплову ефективність, неповну герметичність, підвищені затрати праці на очищення поверхні теплообміну зі сторони газового потоку,

© Товажнянський Л.Л., Арсеньєва О.П., Перевертайленко О.Ю., Кусаков С.К., Василенко О.А., Арсеньєв П.Ю., Юзбашьян А.П., 2019

низьку корозійну стійкість, що унеможливило їх застосування нижче точки роси для димових газів.

Підвищення енергоефективності промислових процесів потребує використання нових підходів [3], які повинні використовувати сучасні принципи інтеграції теплових процесів [4] добре зарекомендованих у підвищенні енергетичної ефективності багатьох промислових процесів, як показано в роботі [5] на прикладі виробництва фосфорних добрив та в роботі [6] при оптимізації енергоспоживання на промисловому майданчику з різними споживачами теплової енергії. Це має бути доповнено використанням високоефективного теплообмінного обладнання нових конструкцій.

Пластинчасті теплообмінні апарати з гофрованою поверхнею теплопередачі є ефективним засобом рекуперації тепла завдяки високій ефективності теплопередачі, компактності та наявності пластин, виконаних з корозійностійких матеріалів [7]. Ці теплообмінники відмінно себе зарекомендували у різних галузях промисловості [8]. Для розширення їх впровадження розроблено різні види спеціальних конструкцій, таких як зварні [9] та з каналами перемінного профілю для конденсаційних процесів [10]. Розрахунок таких теплообмінників ведеться на базі математичного моделювання [11] з використанням емпіричних кореляційних рівнянь [12], напівемпіричних [13] та теоретичних [14] співвідношень. Це дозволило розробити методи розрахунку складних конденсаційних процесів [15] та враховувати вплив забруднень поверхні теплопередачі [16]. Беручи до уваги специфічні риси потоків викидних газів, такі теплообмінники та методи їх розрахунку у даному випадку роботи з викидними газами потребують модифікації. Потрібні пластинчасті теплообмінники спеціальної конструкції, які можуть забезпечити ефективну роботу з викидними газами.

Однією з таких спеціальних конструкцій є так звані «надувні» пластинчасті теплообмінники (у

англомовній літературі – pillow plate heat exchangers), які зараз набувають все більше значення для систем рекуперації викидного тепла [17]. Канали для проходження робочих середовищ формуються за допомогою подачі тиску між двома металевими листами, які попередньо точково зварені. Недолік такої конструкції полягає у тому, що для рекуперації тепла потоку викидних газів часто застосовують потік рідини, в основному, води; цей потік має значно менші об'ємні швидкості, ніж потік викидного газу, тому застосування теплообмінників з однаковими об'ємами сусідніх каналів є недоцільним.

Оптимальним рішенням було створення пластинчасто-панельного теплообмінного апарату з різною формою каналів: стрічково-поточних для газового потоку та змієвикових для потоку рідини.

Метою даної роботи є дослідження тепловіддачі від газового потоку до тепло передаючої стінки у каналі стрічково-поточного типу та коефіцієнта гідравлічного опору руху газового потоку у такому каналі, а також одержання відповідних рівнянь, які є базовими для розрахунків пластинчасто-панельних теплообмінників для охолодження або підігріву газових потоків.

#### Експериментальна частина

Експериментальна установка була створена на базі аеродинамічної труби розімкненого типу, у якості робочого тіла використовувалося повітря, яке подавалося на експериментальну модель у канали стрічково-поточного типу крізь конфузори, а виводилося після експериментальної моделі крізь дифузори. Інше робоче середовище – вода – подавалося у змієвикові канали експериментальної моделі. Експериментальна модель являла собою натурний зразок пластинчасто-панельного апарату та складалася з п'яти панелей. Кожна панель складалася з двох пластин, зварених попарно. Загальний вид пластини представлений на рис. 1.

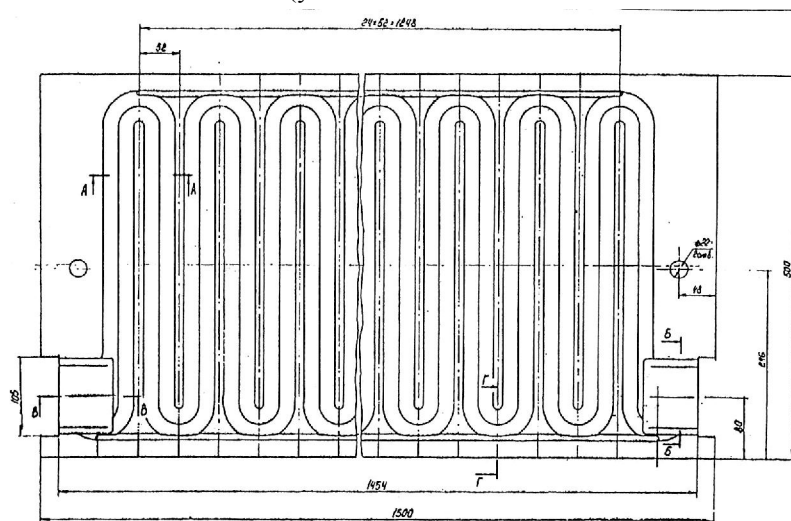


Рис. 1. Загальний вид пластини теплообмінника

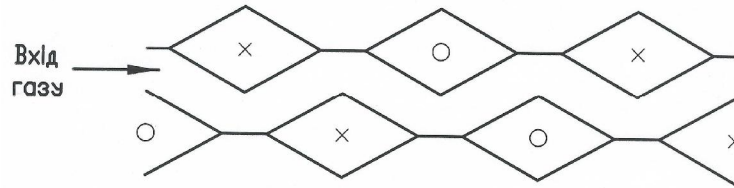
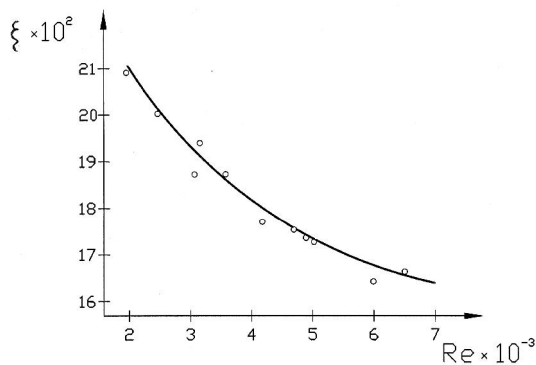


Рис. 2. Канал стрічково-поточного виду

Сусідні панелі попарно зварені таким чином, що утворюється змієвиковий канал для потоку з меншою об'ємною швидкістю, у даному випадку, для води. Сусідні панелі збирають у пакет таким чином, що змійовики сусідніх панелей контактують один з іншим, а між панелями утворюється канал стрічково-поточного типу. Вид цього каналу представлений на рис.2. Геометричні характеристики такого каналу є наступними:

- площа поперечного перерізу – 0,0046 м<sup>2</sup>;
- еквівалентний діаметр – 0,0193 м;
- загальна приведена довжина каналу – 1,47 м;
- приведена довжина гофрованої частини каналу – 1,00 м;

Рис. 3. Експериментальні дані для коефіцієнтів гідравлічного опору ( $\xi$ ) для усього каналу, включаючи вхідні та вихідні ділянки.

На рис. 3 представлені дані для усього каналу, включаючи вхідні та вихідні ділянки, а на рис. 4 представлені дані для гофрованої частини стрічково-поточного каналу.

Відповідне узагальнення експериментальних даних дозволило отримати рівняння у критеріальній формі для розрахунку коефіцієнтів гідравлічного опору одиниці приведеної довжини каналу.

Рівняння для усього каналу, включаючи вхідні та вихідні ділянки, було отримано у наступному вигляді:

$$\xi = 0,847 Re^{-0,185} \quad (1)$$

де  $Re$  – критерій Рейнольдса.  
Згідно зміні значень лінійної швидкості потоку

- ширина пластини – 0,5 м.

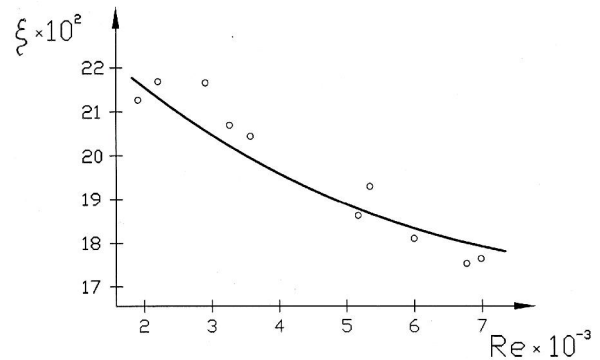
Гарячим теплоносієм була вода, яка нагрівалася у окремому кожухотрубному теплообміннику насиченою водяною парою.

Схема руху потоків в каналах експериментальної моделі – загальна протиточна.

Експерименти проводилися при тиску повітря на вході в пакет не більше 1,1 бар, а лінійні швидкості потоку повітря у каналах знаходилися у діапазоні 1,3 – 5,3 м/с.

#### Обговорення результатів

Експериментальні дані для коефіцієнтів гідравлічного опору та узагальнюючі їх криві представлені на рис. 3 та рис. 4.

Рис. 4. Експериментальні дані для коефіцієнтів гідравлічного опору ( $\xi$ ) для гофрованої частини стрічково-поточного каналу.

повітря у каналі стрічково-поточного типу значення критерію Рейнольдса змінювалися у діапазоні  $1700 < Re < 7000$ .

Рівняння для гофрованої частини каналу було отримано у наступному вигляді:

$$\xi = 0,47 Re^{-0,104} \quad (2)$$

Узагальнення експериментальних даних з тепловіддачі графічно проілюстровано на рис. 5 у вигляді  $Ko=f(Re)$ , де

$$Ko = Nu/Pr^{0,43} \quad (3)$$

де  $Nu$  – критерій Нусельта,  
 $Pr$  – критерій Прандтля.

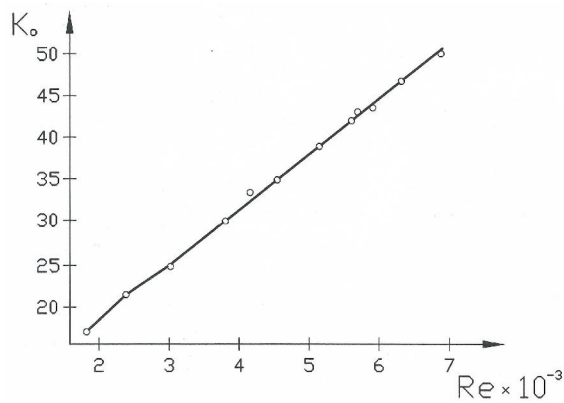


Рис. 5. Експериментальні дані для тепловіддачі

Результати з тепловіддачі повітря у каналах стрічково-поточного типу пластинчатого панельного теплообмінника після їх узагальнення дозволили отримати наступне рівняння у критеріальній формі:

$$Nu = 0,053 Re^{0,77} Pr^{0,43} \quad (4)$$

Втрати тиску та тепловіддача у водяних каналах розраховується згідно загальних методик для труб не круглого поперечного перерізу з поворотами.

**Висновки та перспективи подальшого розвитку даного напрямку.** Отримані базові рівняння у критеріальній формі для розрахунку тепловіддачі та гідравлічного опору у каналах стрічково-поточного типу панельних пластинчатих теплообмінників. Отримані рівняння дозволяють розробити методику розрахунку теплообмінних апаратів такого типу для рекуперації тепла викидних газових потоків та парогазових сумішей для різних технологічних процесів, включаючи процеси харчової промисловості [18, 19, 20], а також при виконанні курсових проектів студентами [21].

#### Список литературы

- Klimes J.J., Arsenyeva O., Kapustenko P., Tovazhnyansky L. (2015) Compact heat exchangers for energy transfer intensification: Low grade heat and fouling mitigation. CRC Press, Boca Raton, FL, USA
- Arsenyeva O.P., Čuček L., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Savchenko Y.A., Kusakov S.K., Matsegora O.I., 2016b, Utilisation of waste heat from exhaust gases of drying process. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*. 10(1), pp. 131–138.
- Klemeš, J. J., Varbanov, P. S., & Kapustenko, P. (2013). New developments in Heat Integration and intensification, including Total Site, waste-to-energy, supply chains and fundamental concepts. *Applied Thermal Engineering*, 1(61), 1–6.
- Клемеш, Й., Костенко, Ю. Т., Товажнянський, Л. Л., Капустенко, П. А., Ульєв, Л. М., Перевертайленко, А. Ю., Зулин, Б. Д. (1999). Применение метода пинч-анализа для проектирования энергосберегающих установок нефтепереработки. *Теорет. основы хим. технологии*, 33(4), 420–431.
- Tovazhnyansky L., Kapustenko P., Ulyev, L., Boldyryev, S., & Arsenyeva, O. (2010). Process integration of sodium hypophosphite production. *Applied thermal engineering*, 30(16), 2306–2314.
- Nemet A, Varbanov P.S, Kapustenko P, Boldyryev S, Klemeš J.J. Capital cost targeting of total site heat recovery. *Chem Eng Trans* 2012;29:1447–52.
- Товажнянський, Л. Л., Капустенко, П. А., Хавин, Г. Л., & Арсеньева, О. П. (2004). Пластинчатые теплообменники в промышленности. Харьков: НТУ «ХПИ».
- Kapustenko, P., Boldyryev, S., Arsenyeva, O., & Khavin, G. (2009). The use of plate heat exchangers to improve energy efficiency in phosphoric acid production. *Journal of Cleaner Production*, 17(10), 951–958.
- Arsenyeva, O. P., Tovazhnyansky, L. L., Kapustenko, P. O., Khavin, G. L., Yuzbashyan, A. P., & Arsenyev, P. Y. (2016). Two types of welded plate heat exchangers for efficient heat recovery in industry. *Applied Thermal Engineering*, 105, 763–773.
- Arsenyeva, O., Tovazhnyansky, L., Kapustenko, P., Perevertaylenko, O., & Khavin, G. (2011). Investigation of the new corrugation pattern for low pressure plate condensers. *Applied Thermal Engineering*, 31(13), 2146–2152.
- Arsenyeva O., Tovazhnyansky L., Kapustenko P., Khavin G. Mathematical modelling and optimal design of plate-and-frame heat exchangers, *Chem. Eng. Trans.* 18 (2009) 791–796.
- Arsenyeva O., Tovazhnyansky L., Kapustenko P., Khavin G., 2011, The generalized correlation for friction factor in crisscross flow channels of plate heat exchangers, *Chemical Engineering Transactions*, 25, 399–404.
- Kapustenko P., Arsenyeva O., Dolgonosova O., 2011, The heat and momentum transfers relation in channels of plate heat exchangers, *Chemical Engineering Transactions*, 25: 357–362.
- Arsenyeva, O. P., Tovazhnyansky, L. L., Kapustenko, P. O., & Demirskiy, O. V. (2014). Generalised semi-empirical correlation for heat transfer in channels of plate heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 70(2), 1208–1215.
- Tovazhnyansky, L.L., Kapustenko, P.O., Nagorna, O.G., & Perevertaylenko, O.Y. (2004). The simulation of multicomponent mixtures condensation in plate condensers. *Heat transfer engineering*, 25(5), 16–22.
- Gogenko A.L., Anipko O.B., Arsenyeva O.P., Kapustenko P.O. Accounting for fouling in plate heat exchanger design, *Chem. Eng. Trans.* 12 (2007) 207–212.
- Arsenyeva O.P., Piper H., Zibart A., Olenburg A., Kenig E.Y. (2018) Heat Transfer and Pressure Loss in Small-Scale Pillow-Plate Heat Exchangers. *Chemical Engineering Transactions*, v.70, p.799–804
- Товажнянський Л.Л., Бухкало С.И., Капустенко П.А., Хавин Г.Л. Основные технологии пищевых производств и энергосбережение. НТУ «ХПИ», Харьков, 2005, – 460 с.
- Товажнянський Л.Л., Бухкало С.И., Капустенко П.О., Арсеньева О.П., Ольховська О.І., Орлова Є.І. Загальна технологія харчової промисловості у прикладах і задачах. Підручник. – К.: ЦНЛ, 2011. – 832 с.
- Товажнянський Л.Л., Бухкало С.И., Зіпунніков М.М. та ін. Загальна технологія харчової промисловості у прикладах і задачах (інноваційні заходи): Підручник. – К.: ЦНЛ, 2013. – 352 с.
- Бухкало С.И. Визначення загальної технології комплексних курсових проектів. Інформаційні технології: наука, техніка, технології, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVII Міжн. н-практ. конференції (MicroCAD-2019), 15–17 мая 2019 р.: у 4 ч. Ч. II / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ «ХПИ». С. 217.

#### References (transliterated)

- Klimes J.J., Arsenyeva O., Kapustenko P., Tovazhnyansky L. (2015) Compact heat exchangers for energy transfer intensification: Low grade heat and fouling mitigation. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.

2. Arsenyeva O.P., Čuček L., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Savchenko Y.A., Kusakov S.K., Matsgora O.I., 2016b, Utilisation of waste heat from exhaust gases of drying process. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 10(1), pp. 131–138.
3. Klemeš, J.J., Varbanov, P.S., & Kapustenko, P. (2013). New developments in Heat Integration and intensification, including Total Site, waste-to-energy, supply chains and fundamental concepts. *Applied Thermal Engineering*, 1(61), pp. 1–6.
4. Klemesh, J., Kostenko, Ju. T., Tovazhnyansky, L. L., Kapustenko, P. A., Ul'ev, L. M., Perevertajlenko, A. Ju., Zulin, B. D. (1999). *Primenenie metoda pinch-analiza dlja proektirovaniya jenergosberegajushih ustanovok neftepererabotki. Teoret. osnovy him. tehnologii*, 33(4), pp. 420–431.
5. Tovazhnyansky, L., Kapustenko, P., Ulyev, L., Boldyryev, S., & Arsenyeva, O. (2010). Process integration of sodium hypophosphite production. *Applied thermal engineering*, 30(16), pp. 2306–2314.
6. Nemet A, Varbanov P.S., Kapustenko P, Boldyryev S, Klemeš J.J. Capital cost targeting of total site heat recovery. *Chem Eng Trans* 2012;29, pp. 1447–52.
7. Tovazhnyansky, L. L., Kapustenko, P. A., Havin, G. L., & Arsen'eva, O. P. (2004). *Plastinchatye teploobmenniki v promyshlennosti*. Harkov: NTU «HPI».
8. Kapustenko, P., Boldyryev, S., Arsenyeva, O., & Khavin, G. (2009). The use of plate heat exchangers to improve energy efficiency in phosphoric acid production. *Journal of Cleaner Production*, 17(10), pp. 951–958.
9. Arsenyeva, O. P., Tovazhnyansky, L. L., Kapustenko, P. O., Khavin, G. L., Yuzbashyan, A. P., & Arsenyev, P. Y. (2016). Two types of welded plate heat exchangers for efficient heat recovery in industry. *Applied Thermal Engineering*, 105, pp. 763–773.
10. Arsenyeva, O., Tovazhnyansky, L., Kapustenko, P., Perevertaylenko, O., & Khavin, G. (2011). Investigation of the new corrugation pattern for low pressure plate condensers. *Applied Thermal Engineering*, 31(13), pp. 2146–2152.
11. Arsenyeva O., Tovazhnyansky L., Kapustenko P., Khavin G. Mathematical modelling and optimal design of plate-and-frame heat exchangers, *Chem. Eng. Trans.* 18 (2009), pp. 791–796.
12. Arsenyeva O., Tovazhnyansky L., Kapustenko P., Khavin G., 2011, The generalized correlation for friction factor in crisscross flow channels of plate heat exchangers, *Chemical Engineering Transactions*, 25, pp. 399–404.
13. Kapustenko P., Arsenyeva O., Dolgonosova O., 2011, The heat and momentum transfers relation in channels of plate heat exchangers, *Chemical Engineering Transactions*, 25: pp. 357–362.
14. Arsenyeva, O.P., Tovazhnyansky, L.L., Kapustenko, P.O., & Demirskiy, O.V. (2014). Generalised semi-empirical correlation for heat transfer in channels of plate heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 70(2), pp. 1208–1215.
15. Tovazhnyansky, L.L., Kapustenko, P.O., Nagorna, O.G., & Perevertaylenko, O.Y. (2004). The simulation of multicomponent mixtures condensation in plate condensers. *Heat transfer engineering*, 25(5), pp. 16–22.
16. Gogenko A.L., Anipko O.B., Arsenyeva O.P., Kapustenko P.O. Accounting for fouling in plate heat exchanger design, *Chem. Eng. Trans.* 12 (2007), pp. 207–212.
17. Arsenyeva O.P., Piper H., Zibart A., Olenburg A., Kenig E.Y. (2018) Heat Transfer and Pressure Loss in Small-Scale Pillow-Plate Heat Exchangers. *Chemical Engineering Transactions*, v.70, pp. 799–804.
18. Tovazhnyansky L.L., Bukhhalo S.I., Kapustenko P.A., Havin G.L. *Osnovnye tehnologii pishhevyykh proizvodstv i jenergosberezhenie*. NTU «KhPI», Khar'kov, 2005, – 460 p.
19. Tovazhnyansky L.L., Bukhhalo S.I., Kapustenko P.O., Arsen'eva O.P., Ol'hov'ska O.I., Orlova E.I. *Zagal'na tehnologija harchovoï promislivosti u prikladah i zadachah*. Pidruchnik. K.: CNL, 2011. 832 p.
20. Tovazhnyansky L.L., Bukhhalo S.I., Zipunnikov M.M. ta in. *Zagal'na tehnologija harchovoï promislivosti u prikladah i zadachah (innovacijni zahodi)*: Pidr. K.: CNL, 2013. 352 p.
21. Bukhhalo S.I. *Viznachennja zagal'noi tehnologii kompleksnih kursiv proektiv*. Informacijni tehnologii: nauka, tehnika, tehnologii, osvita, zdorov'ja: tezi dop. XXVII Mizhn. n-prakt. konf.(MicroCAD-2019), 15–17 maja 2019: Ch. II. / za red. prof. Sokola C.I. – Harkiv: NTU «KhPI», p. 217.

*Надійшла (received) 19.05.2019*

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Товажнянський Леонід Леонідович (Товажнянский Леонид. Леонидович, Tovazhnyansky Leonid Leonidovich)** – почесний ректор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9000-3824>; e-mail: [cfe.ukraine@gmail.com](mailto:cfe.ukraine@gmail.com)

**Арсеньєва Ольга Петрівна (Арсеньева Ольга Петровна, Arsenyeva Olga. Petrivna)** – доктор технічних наук, професор кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9013-6451>; e-mail: [o.p.arsenyeva@gmail.com](mailto:o.p.arsenyeva@gmail.com)

**Перевертайленко Олександр Юрійович (Перевертайленко Александр Юрьевич, Perevertaylenko Oleksandr Yuriyovich)** – старший науковий співробітник кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4054-6588>; e-mail: [pau@kpi.kharkov.ua](mailto:pau@kpi.kharkov.ua)

**Кусаков Сергій Константинович (Кусаков Сергей Константинович, Kusakov Sergey Konstantinovich)** – аспірант кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7192-7784>; e-mail: [sergey.kusakov@gmail.com](mailto:sergey.kusakov@gmail.com)

**Василенко Олександр Анатолійович (Василенко Александр Анатольевич, Vasilenko Aleksandr. Anatolevich)** – аспірант кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4054-6588>; e-mail: [kirgleb1969@gmail.com](mailto:kirgleb1969@gmail.com)

**Арсеньєв Павло Юрійович (Арсеньев Павел Юрьевич, Arsenyev Pavlo Yuriyovich)** – аспірант кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1911-8362>; e-mail: [spavlo.arsenyev@kpi.kharkov.ua](mailto:spavlo.arsenyev@kpi.kharkov.ua)

**Юзбашьян Анна Петрівна (Юзбашьян Анна Петровна, Yuzbashyan Anna Petrivna)** асистент кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4468-5094>; e-mail: [anya4ever@ukr.net](mailto:anya4ever@ukr.net)