

ТЕПЛОТЕХНІКА ТА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

УДК 66.067.1.621.72

doi: 10.31498/2225-6733.38.2019.181285

© Ключев О.І.¹, Луняка К.В.², Русанов С.А.³

ДОСЛІДЖЕННЯ РІВНОМІРНОСТІ РОЗПОДІЛУ РІДИНИ ПО ТРУБАХ КОЖУХОТРУБЧАСТОГО ТЕПЛООБМІННОГО АПАРАТУ ПРИ РІЗНИХ СПОСОБАХ ВВЕДЕННЯ РІДИНИ В АПАРАТ І СТВОРЕННЯ НОВИХ КОНСТРУКЦІЙ РОЗПОДІЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

Представлені результати досліджень впливу розташування вхідного патрубку на рівномірність розподілу теплоносія по трубах кожухотрубчастого теплообмінного апарату та енергії, що витрачається на перекачування теплоносія. Дослідження показали, що при використанні розподільних вставок з розрахованою по фрагментах кількістю отворів на рівномірність розподілу теплоносія та витрату енергії для перекачування рідини через апарат впливає розташування вхідного патрубку. На основі отриманих даних запропонована конструкція вставки, яка поєднує конструктивні особливості теплообмінника типу «труба в трубі» і кожухотрубчастого.

Ключові слова: теплообмінний апарат, рівномірність розподілу теплоносія по трубах, витрата енергії на перекачування рідини, розподільні пристрої.

Ключев О.И., Луняка К.В., Русанов С.А. Исследование равномерности распределения жидкости по трубам кожухотрубного теплообменного аппарата при разных способах ввода жидкости в аппарат и создание новых конструкций распределительных устройств. Представлены результаты исследований влияния расположения входного патрубка на равномерность распределения теплоносителя по трубам кожухотрубного теплообменного аппарата и энергии, расходуемой на перекачивание теплоносителя. Исследования показали, что при использовании распределительных вставок с рассчитанным по фрагментам числом отверстий на равномерность распределения теплоносителя и расход энергии для перекачивания жидкости через аппарат влияет расположение входного патрубка. На основе полученных данных предложена конструкция вставки, которая объединяет конструктивные особенности теплообменника типа «труба в трубе» и кожухотрубного.

Ключевые слова: теплообменный аппарат, равномерность распределения теплоносителя по трубам, расход энергии на перекачивание жидкости, распределительные устройства.

O.I. Klyuev, K.V. Lunyaka, S.A. Rusanov. The research of the fluid distribution through the pipes of a shell-and-tube heat exchanger when employing different methods of fluid injection into the apparatus and new distribution devices creation. The results of studies of the inlet pipe location (axial, radial, tangential) influence on the uniform distribution of the heat carrier through the pipes of a shell-and-tube heat exchanger and the energy consumed for pumping the heat carrier are presented. As it becomes apparent from researches, radial and tangential introduction has advantages over axial introduction as to evenness of liquid distribution along the pipes of heat exchanger and power expended on pumping. So, with radial introduction it is possible to attain practically even distribution of heat carrier along the pipes, influencing on such structural fea-

¹ канд. техн. наук, доцент, Херсонський національний технічний університет, м. Херсон, ohvpbm@i.ua

² д-р техн. наук, професор, Херсонська філія НУК ім. адмірала Макарова, м. Херсон, lunyaka213@ukr.net

³ канд. техн. наук, доцент, Херсонський національний технічний університет, м. Херсон, ohvpbm@i.ua

tures of heat exchanger, as correlation of diameters of the inlet pipe and the lid ($D_{ap}/D_0 = 4,7$). With less diameter of the inlet pipe ($D_{ap}/D_0 = 7,5$) it is possible to attain equalization of the speeds of the heat-carrier in different pipes increasing the relation of the lid height to its diameter (h/D_{ap}); it being necessary to take into account when making heat-exchangers. If these criteria are not adhered to it is necessary to use special distributive devices. With respect to the expense of power, used for pumping liquid it is expended the least with tangential introduction of liquid into the heat exchanger. As to the axial introduction of liquid into the heat exchanger it is impossible to attain even distribution of speeds of heat carrier over the plane of the pipe grate just increasing the diameter of the inlet pipe and the lid height, therefore special distributive devices are required in this case to get even speeds. To adjust the hydraulic resistance over the heat exchanger section it was suggested to use flat insertions with the calculated resistance of the fragments. The necessary resistance was created by drilling out the necessary number of openings, it being determined from Euler equation. Based on the obtained data, an insert design has been proposed, which combines the design features of both a "pipe-in-pipe" type heat exchanger and a shell-and-tube heat exchanger.

Keywords: heat exchanger, uniform distribution of heat carrier through pipes, power expense for pumping liquid, distribution devices.

Постановка проблеми. З метою підвищення ефективності роботи кожухотрубчастих теплообмінних апаратів (КТА) застосовують різні способи керування гідродинамікою процесів, серед яких широко розповсюджене використання турбулізаторів та завихрювачів. Але використання таких пристроїв призводить до збільшення гідравлічного опору апарату та підвищення витрат енергії на перекачування рідини. Представляє інтерес вивчення питання підвищення ефективності роботи КТА одночасно зі зниженням енерговитрат шляхом зміни такої конструктивної особливості теплообмінних апаратів, як розташування вхідного патрубку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підвищення ефективності роботи теплообмінників проводиться у напрямку збільшення поверхні теплообміну або створення турбулентних потоків теплоносіїв в апараті; часто ці методи взаємопов'язані [1]. Недоліком останнього методу є збільшення гідравлічного опору [2], що призводить до підвищеної витрати енергії на перекачування рідини.

Якщо в процесі теплообміну задіяні не всі труби, це призводить до зменшення поверхні теплообміну, а, значить, до зниження тепловіддачі. Тому створення в окремих трубах потоків з однаковими швидкостями сприяє покращенню теплообміну й оберігає труби, в яких швидкість потоку мала, від перегріву з усіма можливими наслідками.

В роботах [3-5] пропонується метод, який за своєю суттю спрямований на підвищення теплопередачі шляхом збільшення поверхні теплообміну в існуючих апаратах за рахунок введення у дію тих труб, де швидкість руху теплоносія вкрай низька.

Проведені авторами дослідження, що присвячені вивченню впливу рівномірності розподілу рідини по трубах на характер роботи КТА [3], дозволили розробити наукові підходи до створення рівномірного потоку шляхом впливу на технологічні та низку конструктивних параметрів, зокрема, співвідношення діаметрів апарату та вхідного патрубку і висоти кришки. Представляє інтерес дослідження такої конструктивної особливості апарату, як спосіб введення рідини, та вплив на енерговитрати при перекачуванні теплоносія з одночасним вирівнюванням швидкостей потоку в різних трубах апарату.

Мета роботи – вивчення можливості зниження витрати енергії при перекачуванні рідини через труби КТА шляхом зміни такої його конструктивної особливості, як спосіб введення рідини в апарат.

Викладення основного матеріалу. Введення рідини в трубний простір теплообмінного апарату можливо через патрубків, розташований по осі апарату, радіально або тангенціально.

Для кожного зі способів розташування вхідного патрубку були проведені дослідження розподілу швидкості рідини по трубах КТА, виміряні втрати тиску на перекачування і визначена потужність, що витрачається. Експерименти проводились на стенді, описаному в [3]. Похибка складає 4-5%. Нерівномірність розподілу рідини по трубах кількісно оцінювалась відношенням швидкостей $\omega_{\max}/\omega_{\min}$. Результати наведені в таблиці.

Таблиця

Порівняння потужності, споживаної насосом для перекачування рідини крізь КТА при різних способах введення рідини в апарат і використанні розподільних вставок (при однакових технологічних та інших конструктивних параметрах)

Ділянка плоскої вставки	Розрахункові значення кількості отворів	$\omega_{\max}/\omega_{\min}$	Лабораторний КТА		Промисловий теплообмінник з витратою, що перевищує лабораторний у 14,3 рази*
			Δp , кПа	Потужність, кВт	
Осьове введення					
Без вставки	-	2,39	28,6	0,043	0,61
Центральна	3	1,05	30,3	0,045	0,64
Проміжна	9				
Периферійна	25				
Радіальне введення					
Без вставки		1,32	27,5	0,041	0,59
Ближня	38	1,03	29,1	0,044	0,63
Проміжна	39				
Дальня	22				
Тангенціальне введення					
Без вставки	-	1,37	23,2	0,035	0,50
Центральна	9	1,04	24,6	0,037	0,53
Проміжна	11				
Периферійна	36				

*У якості промислового обраний теплообмінник з діаметром кожуха 600 мм, діаметром труб 20×2 мм, кількістю труб 389 (ГОСТ 15118-79, ГОСТ 15120-79 і ГОСТ 15122-79).

Наведені в таблиці дані свідчать, що при будь-якому способі введення рідини в теплообмінник відбувається нерівномірний розподіл швидкості теплоносія по трубах діаметрального ряду апарату, причому найбільша нерівномірність має місце при осьовому введенні рідин ($\omega_{\max}/\omega_{\min} = 2,39$). Тут же спостерігається найбільш висока витрата енергії на переміщення рідини.

Як видно з наведених даних, радіальне та тангенціальне введення з точки зору рівномірності розподілу рідини по трубах апарату і потужності, що витрачається на перекачування, мають перевагу перед осьовим введенням. Так, при радіальному введенні можна досягти практично рівномірного розподілу теплоносія по трубах, впливаючи на такі конструктивні особливості апарату, як співвідношення діаметрів вхідного патрубку і кришки ($D_{an}/D_o = 4,7$). При меншому діаметрі вхідного патрубку ($D_{an}/D_o = 7,5$) зближення величин швидкостей теплоносія у різних трубах можна досягти шляхом збільшення відношення висоти кришки до її діаметру (h/D_{an}), що необхідно враховувати при виготовленні теплообмінних апаратів [3]. При невиконанні названих умов є потреба у використанні спеціальних розподільних пристроїв.

Що стосується потужності, що витрачається на прокачування рідини через апарат, то найменша її потужність витрачається при тангенціальному введенні рідини.

При осьовому ж введенні рідини в КТА збільшенням діаметру вхідного патрубку і висоти кришки не можна досягти рівномірного розподілу швидкостей теплоносія по площині трубної решітки, тому в цьому випадку для отримання рівномірного профілю швидкостей потрібні спеціальні розподільні пристрої [3].

Найбільш простими є плоскі вставки, які являють собою диски з отворами. Якщо найбільший тиск у колекторній камері, в яку подається теплоносій, припадає на середню частину трубної решітки (як це має місце при осьовому введенні рідини в апарат – див рис. 1, а), то у цьому місці вставки, яка поміщається до трубної решітки, гідравлічний опір треба підвищити, направивши потік теплоносія до периферії. Регулювати гідравлічний опір можна шляхом висвердлення потрібної кількості отворів на кожному фрагменті вставки.

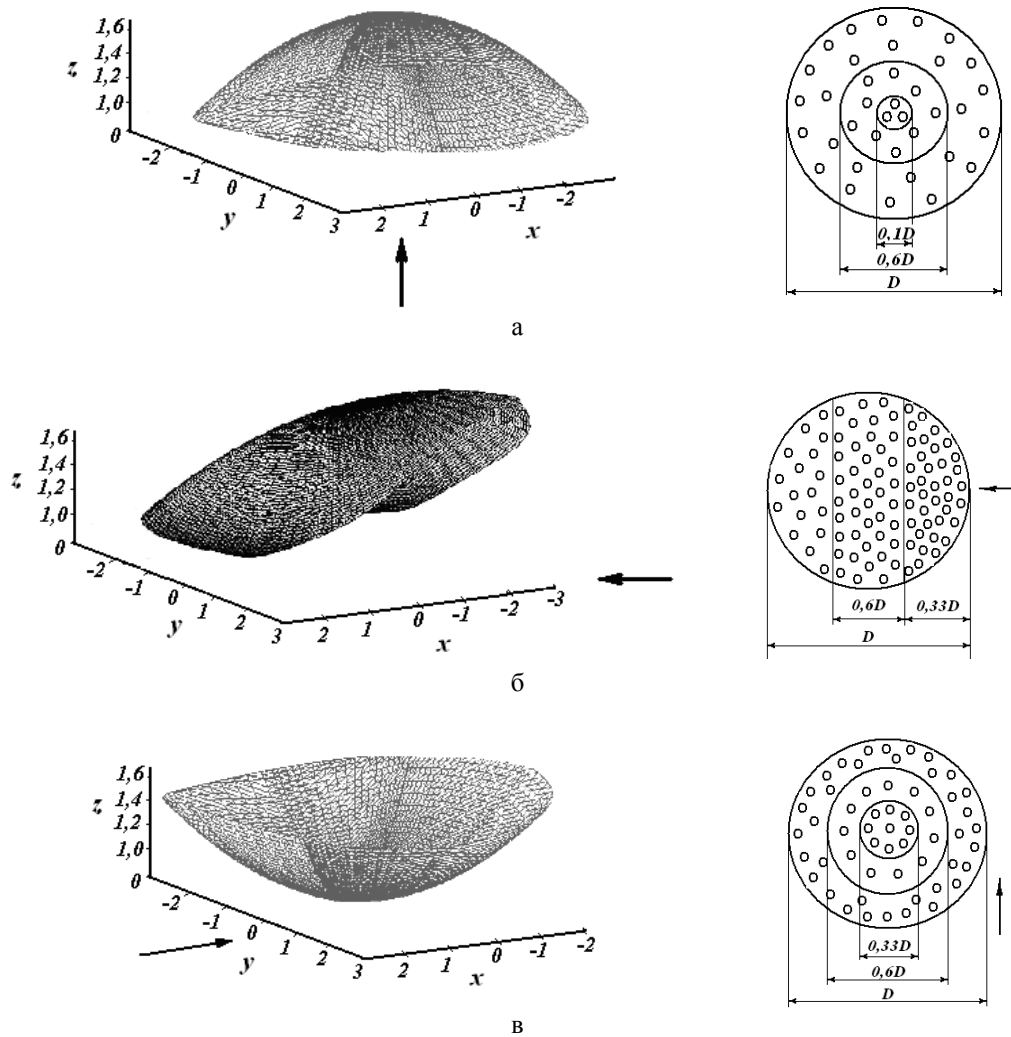


Рис. 1 – Поверхні розподілу тисків і кількість отворів у плоскій вставці при різному способі введення рідини (показано стрілками) в КТА: а – осьове; б – радіальне; в – тангенціальне введення теплоносія в апарат; по осях відкладено: x, y – відстані від центру трубної решітки, 10^{-2} м; z – тиск рідини у трубці, 10^{-3} Па

Визначення кількості отворів на кожній ділянці плоскої вставки проводилось шляхом виведення критеріального рівняння руху рідини через вставку загального вигляду

$$Eu = f(Re, \Gamma_b, \Gamma_H, \Gamma_d, \Gamma_h),$$

де $\Gamma_b, \Gamma_H, \Gamma_d, \Gamma_h$ – симплекси геометричної подібності, які враховують, відповідно, відстань вставки від вхідного патрубку, висоту кришки, діаметр вхідного патрубка і відстань вставки від трубної решітки.

Отримуючи величини критерію Ейлера при різних значеннях згаданих симплексів і використовуючи взаємозв'язок між критерієм Ейлера і коефіцієнтом місцевого опору певної ділянки вставки, розраховували кількість отворів на цій ділянці в залежності від обраного діаметру.

На рис. 1 представлені поверхні розподілу тисків при осьовому (а), радіальному (б) і тангенціальному (в) введенні теплоносія в апарат, отримані шляхом апроксимації експериментальних даних. У правій частині рисунків відмічені границі фрагментів, для яких розраховувалась кількість отворів.

При тангенціальному введенні теплоносія в апарат у периферійній частині перерізу колекторної камери виникає потік рідини з підвищеним тиском. Посередині ж цього простору тиск низький (рис. 2). Керуючись отриманими даними, ми запропонували у колекторній камері, наприклад, у нижній, встановити суцільну циліндричну вставку, яка обмежує простори з високим

і низьким тисками. Теплоносій потрапляє у труби, що знаходяться у периферійній частині апарату, проходить по них і надходить до верхньої колекторної камери, звідки спрямовується у труби апарату, розташовані ближче до центру – теплообмінник з однокходового перетворюється на двохходовий. При цьому вхід і вихід теплоносія знаходяться з одного боку апарату (в даному разі – знизу), що спрощує обслуговування теплообмінника.

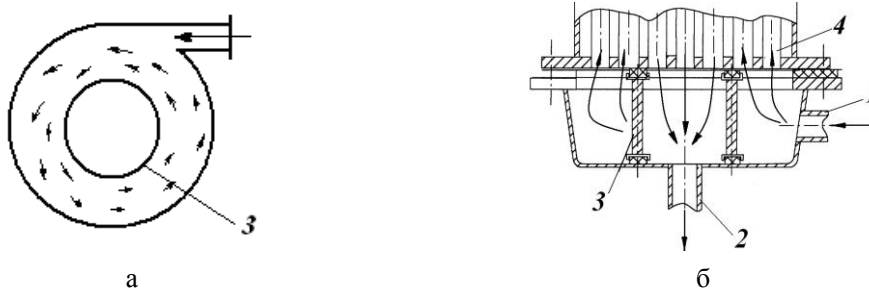


Рис. 2 – Положення циліндричної вставки при тангенціальному введенні рідини в кожухотрубчастий теплообмінний апарат: а – горизонтальний переріз колекторної камери; б – спрямування потоків рідини з колекторної камери в трубний простір (1 – вхідний патрубок; 2 – вихідний патрубок; 3 – вставка; 4 – труби)

Колекторну камеру тут можна розглядати як частину теплообмінника типу «труба в трубі», де вставка являє собою внутрішню трубу. Були виміряні тиски поблизу вставки і поблизу бокової поверхні кришки. Вони склали, відповідно, 13,1 і 92,8 кПа. Таким чином, у периферійній частині простору колекторної камери утворюється підвищений тиск, який проштовхує рідину по трубах у верхню камеру. Завдяки цьому потужність, що витрачається для перекачування рідини через лабораторний апарат, складає 0,018 кВт, для промислового теплообмінника – 0,26 кВт.

Висновки

Дослідження показали, що розташування вхідного патрубку суттєво впливає на рівномірність розподілу рідини по трубах кожухотрубчастого теплообмінника і потужність, що потрібна для прокачування теплоносія через апарат, а саме, тангенціальне введення разом з використанням розподільної вставки з розрахованою кількістю отворів по фрагментах дозволяє на 18% знизити потужність, що витрачається на прокачування рідини. Вивчення характеру розподілу швидкостей дозволило створити плоскі вставки, які регулюють тиск рідини перед її входженням в труби апарату.

Перелік використаних джерел:

1. Kaminski D.A. Introduction to thermal and fluid engineering / D.A. Kaminski, M.K. Jesen. – Johh Willy Sons, Inc. Danvers, 2005. – 783 p.
2. Валуева Е.П. Оценка теплогидравлической эффективности рекуперативных теплообменных аппаратов / Е.П. Валуева, Т.А. Доморацкая // Теплоэнергетика : Сб. науч. тр. Московского энергетического института. – М., 2000. – № 3. – С.43-48.
3. Ключев О.І. Оптимізація роботи кожухотрубного теплообмінника шляхом впливу на гідродинаміку потоку : автореф. дис... канд. техн. наук: 05.17.08 / Ключев Олег Ігоревич. – Херсон, 2006. – 24 с.
4. Луняка К.В. Створення рівномірного розподілу швидкості руху теплоносія в трубах кожухотрубчастого теплообмінника за допомогою розподільних вставок / К.В. Луняка, О.І. Ключев, С.А. Русанов // Транспорт, механічна інженерія, експлуатація, матеріалознавство (ТМІЕМ-2017) : матеріали міжнар. наук.-техн. конф. (21-22 вересня 2017 р.; Херсон). – Херсон, 2017. – С. 35-36.
5. Луняка К.В. Вплив розподільних вставок в кожухотрубчастих теплообмінниках на величину рушійної сили процесів теплообміну / К.В. Луняка, О.І. Ключев, С.А. Русанов // Холод в енергетиці і на транспорті : тези доп. учасн. IV міжнар. наук.-техн. конф. (12-13 жовтня 2017 р.; Миколаїв). – 2017. – С. 464.

References:

1. Kaminski D.A., Jesen M.K. Introduction to thermal and fluid engineering. Johg Willy Sons, Inc. Danvers Publ., 2005. 783 p.
2. Valueva E.P., Domoratskaya T.A. Otsenka teplogidravlicheskoj effektivnosti rekuperativnykh teploobmennyykh apparatov [Evaluation of the heat-hydraulic efficiency of recuperative heat exchangers]. *Teploenergetika – Heat power engineering*, Moscow, 2000, no. 3, pp. 43-48. (Rus.)
3. Klyuyev O.I. *Optimizatsiia roboti kozhukhotrubnogo teploobminnika shliakhom vplivu na gidrodinamiku potoku*. Avtoref. diss. kand. techn. nauk [Optimization of heat exchanges job by influence on hydrodynamics of a flow. Cand. tech. sci. diss. thesis]. Kherson, 2006. 24 p. (Ukr.)
4. Lunyaka K.V., Klyuev O.I., Rusanov S.A. Stvorennia rivnomirnogo rozpodilu shvidkosti rukhu teplonosii v trubakh kozhukhotrubchastogo teploobminnika za dopomogoiu rozpodil'nikh vstavok. *Materiali Mizhn. nauk.-tehn. konf. «Transport, mekhanichna inzheneriia, ekspluatatsiia, materialoznavstvo» (ТМІЕМ-2017)* [Creation of a uniform distribution of the heat transfer velocity in the pipes of the shell and tubular heat exchanger with the help of distributive inserts. Proceedings of Int. Sci.-Techn. Conf. «Transport, mechanical engineering, operation, material sciences» (ТМІЕМ-2017)]. Kherson, 2017, pp. 35-36. (Ukr.)
5. Lunyaka K.V., Klyuev O.I., Rusanov S.A. Vpliv rozpodil'nikh vstavok v kozhukhotrubchastikh teploobminnikakh na velichinu rushiinoї sili protsesiv teploobminu. *Anotatsii IV Mizhn. nauk.-tehn. konf. «Holod v energetytsi i na transporty»* [Influence of distribution inserts in shell and tubular heat exchangers on the magnitude of the driving force of heat transfer processes. Abstracts of IV Int. Sci.-Techn. Conf. «Cold in energy and transport»]. Mykolaiv, 2017, p. 464. (Ukr.)

Рецензент: Б.В. Димо

канд. техн. наук, проф., НУК ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

Стаття надійшла 15.03.2019

УДК 662.61

doi: 10.31498/2225-6733.38.2019.181290

© Віннікова В.Г.¹, Холькін О.М.²

ПРО МЕХАНІЗМ ГОРІННЯ ТВЕРДОГО ПАЛИВА

Механізм горіння твердого палива являє собою сукупність різних зон горіння, що характеризують багатостадійний процес перетворення вихідного палива в кінцеві продукти згорання. Спостереження, здійснені візуально і фотографічним способами, показали, що в інтервалі тиску від 1 до 150 атм. поміж поверхнею горіння зразка, на якій відбувається газифікація конденсованої фази, та зоною максимальної температури існує ще одна зона, яка називається «темною зоною». У цій зоні тривають інтенсивні хімічні реакції, які завершують газифікацію конденсованої фази та постачають продукти горіння в факел полум'я. Результати дослідження показали, що максимальне тепловиділення відбувається в конденсованій фазі палива. Аналіз поглинальної здатності факела полум'я показав, що зона максимальної температури наближається до поверхні зразка палива, а відведення тепла з димогазових зон становить 5-10% від загальної кількості тепла, що виділяється в реакційній зоні зразка. У результаті досліджень встановлено, що провідну роль при горінні твердого палива грає конденсована фаза. При цьому можна змінювати не тільки швидкість горіння, а й її температурний профіль.

Ключові слова: горіння, тверде паливо, порох, конденсована фаза.

¹ канд. техн. наук, доцент, «Азовський морський інститут» НУ «ОМА», м. Маріуполь, expert-capital@yandex.ua

² д-р фіз.-мат. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, a.kholkin@gmail.com