

МОДИФІКАЦІЇ КОНСТРУКЦІЇ ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТІВ ТИПУ «ТРУБА В ТРУБІ»

Василенко О.К.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, alexandra.vasylenko-bi11@iit.kpi.ua

Abstract

This article examines recent advancements in enhancing the thermal performance of pipe-in-pipe heat exchangers (PiPHE). By analyzing contemporary research, the study identifies effective strategies such as the use of nanofluids, geometric modifications, and flow disturbance techniques. The findings aim to provide insights into optimizing PiPHE designs for improved heat transfer efficiency.

Keywords: *Pipe-in-pipe heat exchanger, heat transfer enhancement, nanofluids, geometric modifications, passive techniques, active techniques*

Вступ. Теплообмінні апарати типу «труба в трубі» є одними з найпростіших та найнадійніших конструкцій для передачі тепла між двома середовищами. Вони знаходять широке застосування в енергетиці, харчовій, хімічній, нафтогазовій галузях, де необхідно забезпечити ефективний теплообмін в умовах обмеженого простору. Проте традиційна конструкція має певні обмеження, особливо за умов підвищених вимог до інтенсивності теплопередачі. У зв'язку з цим зростає інтерес до методів підвищення ефективності роботи теплообмінних апаратів типу «труба в трубі» шляхом конструктивних змін або впровадження новітніх технологій. Сучасні дослідження фокусуються як на зміні геометрії труб, так і на використанні передових теплоносіїв, зокрема нанофлюїдів.

Метою цього дослідження є узагальнення найбільш перспективних підходів до покращення теплообміну в теплообмінних апаратах типу «труба в трубі» без суттєвого ускладнення їхньої конструкції.

Матеріали та методи. Матеріалом для аналізу стали актуальні рецензовані наукові публікації, опубліковані переважно протягом останніх п'яти років, які присвячені модифікаціям теплообмінних апаратів типу «труба в трубі». У дослідженні розглянуто два основні напрямки покращення: пасивні методи (зміна геометрії, застосування турбулізаторів, нанофлюїди) та активні (ультразвукова активація, обертання внутрішньої труби).

Методи оцінки ефективності базуються на числі Нуссельта, коефіцієнті тертя, тепловій ефективності та загальному прирості теплопередачі. Джерела були відібрані з міжнародних журналів з високим рівнем цитування та актуальністю для практичного застосування. Акцент зроблено на дослідження, що стосуються саме конструкцій «труба в трубі», а не ширших категорій двотрубних систем. Інформація була систематизована з метою виявлення найбільш ефективних підходів до оптимізації.

Результати та обговорення. Сучасні дослідження пропонують кілька перспективних методів покращення теплообмінних апаратів типу «труба в трубі». Розглянемо основні з них.

Нанофлюїди. Використання нанофлюїдів як теплоносія у теплообмінниках типу «труба в трубі» показало значний потенціал у підвищенні ефективності теплопередачі. Нанофлюїди – це дисперсії наночастинок металів або оксидів металів (наприклад, Al_2O_3 , CuO , Fe_2O_3) у традиційних рідинах, таких як вода або етиленгліколь. Їхня покращена теплопровідність сприяє збільшенню кількості тепла, яке буде передане за одиницю часу.

Наприклад, дослідження [1] показали, що використання гібридного нанофлюїду $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Fe}_2\text{O}_3$ при концентрації всього 0,3% може забезпечити приріст тепловіддачі на 6%. При цьому збільшення концентрації наночастинок до 3% може підвищити коефіцієнт теплопередачі на 14% [2]. Важливо зазначити, що підвищення в'язкості рідини також збільшує гідравлічні втрати, тому оптимізація концентрації має ключове значення. Перевагою нанофлюїдів є те, що вони не вимагають зміни конструкції теплообмінника, що робить цей метод легким для впровадження.

Зміна геометрії внутрішньої або зовнішньої труби є одним із найефективніших пасивних способів покращення теплопередачі. Одним з прикладів є перехід від класичних циліндричних форм до конічних, які створюють змінний переріз потоку вздовж довжини теплообмінника. Це призводить до зростання турбулентності та інтенсифікації процесів конвекції. У результаті таких змін тепловіддача може зрости до 54%, а число Нуссельта – на 63% порівняно зі звичайними циліндричними трубами [3].

Дослідження [3] також вказує, що зміна профілю внутрішньої труби на ребристий або спіралеподібний дозволяє значно збільшити ефективність за рахунок посиленого перемішування рідини та зменшення ламінарного шару. Такі модифікації не тільки покращують теплообмін, але й можуть знизити габарити пристрою при збереженні його продуктивності.

Турбулізатори – це конструктивні елементи або вставки, призначені для порушення ламінарності потоку задля підвищення тепловіддачі. Їх конструкції можуть бути від простих стрічок до складних перфорованих або спіральних елементів. Одним із найбільш перспективних рішень є використання перфорованих еліптичних турбулізаторів, які дозволяють збільшити число Нуссельта до 157,9% [4]. Завдяки численним вихорам, створеним такими елементами, поліпшується перемішування потоку, а отже – і передача тепла до стінок труби. Проте слід врахувати, що турбулізатори також підвищують гідравлічний опір, що може вимагати додаткової енергії на перекачування рідини. Важливо підібрати такі конструкції, які забезпечують оптимальне співвідношення між збільшенням тепловіддачі і втратами тиску. Турбулізатори також можуть використовуватись у поєднанні з нанофлюїдами для досягнення синергетичного ефекту.

Активні методи покращення теплообміну передбачають зовнішній вплив на потік або стінки теплообмінника. Одним з найефективніших способів є

ультразвукове збурення, яке викликає мікроскопічні коливання рідини та турбуленцію поблизу стінок. Дослідження [5] показують, що при застосування ультразвукового впливу з частотою 40 кГц та потужністю 240 Вт теплопередача зростає на 104%.

Іншим цікавим методом є обертання внутрішньої труби, що змінює характер потоку від осьового до спіралеподібного. При цьому особливу роль відіграє ексцентриситет – зміщення осі внутрішньої труби щодо зовнішньої. За певних режимів це дозволяє значно підвищити ефективність без надмірного зростання втрат тиску [6]. Хоча ці методи потребують додаткових витрат енергії або механічного обладнання, вони відкривають нові можливості для адаптації теплообмінних апаратів типу «труба в трубі» до складних теплових режимів.

Висновки. Аналіз сучасних досліджень показує, що модифікації теплообмінних апаратів типу «труба в трубі», такі як використання нанофлюїдів, геометричні зміни та застосування турбулізаторів, значно покращують теплову ефективність. Активні методи, хоча й вимагають додаткових енергетичних витрат, також демонструють високий потенціал. Оптимальне поєднання цих методів може забезпечити максимальну ефективність теплообмінників без значного ускладнення конструкції.

Список використаної літератури:

1. Qasim M., Basher H., Salman M. Enhancement of heat transfer in double pipe heat exchanger using $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{water}$ hybrid nanofluid. *The iraqi journal for mechanical and materials engineering*. 2021. Т. 21, № 2. С. 148–163. URL: <https://doi.org/10.32852/ijjfmme.v21i2.549>.
2. Enhancement of heat transfer rate with structural modification of double pipe heat exchanger by changing cylindrical form of tubes into conical form. *Applied thermal engineering*. 2017. Т. 118. С. 408–417. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.02.095>.
3. Hadi H., Hussein R., Aljanabi A. Enhancement of heat transfer strategies in double pipe heat exchanger: a review. *The iraqi journal for mechanical and materials engineering*. 2024. Т. 23, № 2. С. 14–41. URL: <https://doi.org/10.32852/xyhcd368>.
4. Erfanian Nakhchi M., Hatami M., Rahmati M. Experimental investigation of performance improvement of double-pipe heat exchangers with novel perforated elliptic turbulators. *International journal of thermal sciences*. 2021. Т. 168. С. 107057. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.107057>.
5. Mete S., Gawali B. Heat transfer enhancement in double pipe heat exchanger using ultrasonic vibrations. 2021. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106003>.
6. Moawed M., Ibrahim E., Gomaa A. Thermal performance of a pipe in pipe heat exchanger with sinusoidal inner pipe. *Energy conversion and management*. 2008. Т. 49, № 4. С. 678–686. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.07.036>.