

## ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ІНТЕНСИВНОСТІ ТЕПЛООБМІНУ У ВИТИХ ТЕПЛООБМІННИКАХ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ДВОФАЗНИХ ТЕПЛОНОСІЇВ

Д. т. н. В. О. Туз, к. т. н. Н. Л. Лебедь, М. П. Литвиненко

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Україна, м. Київ

valeriituz56@gmail.com, nata.lebeddom@gmail.com, grassorc412@ukr.net

*Для уточнення методики розрахунку конструктивних параметрів витих теплообмінників при використанні двофазних теплоносіїв пропонується враховувати особливості процесів теплообміну і гідродинаміки гомогенних і гетерогенних середовищ. Для цього відповідно до зазначених умов рекомендовано використовувати відомі емпіричні кореляції, отримані на основі результатів дослідження процесу конвективного теплообміну при взаємодії двофазного потоку у витому теплообміннику, розташованому в кільцевому каналі.*

*Ключові слова: витий теплообмінник, конвективний теплообмін у кільцевих каналах.*

Виті теплообмінники знайшли широке застосування в технологічних системах охолодження радіоелектронного обладнання. Можливість компенсації температурних та механічних напружень завдяки витій конструкції забезпечує довготривалу та безаварійну роботу теплообмінного обладнання. Кріогенні установки, які працюють за циклом J-T (Джоуля — Томсона), мають певні переваги завдяки відносно простій конструкції основних елементів, низьким експлуатаційним витратам, надійності та великому ресурсу роботи. Значною мірою ефективність установки залежить від вибору теплоносія, схемного рішення, а також від конструкції рекуперативного теплообмінного апарату.

Серед основних методів підвищення техніко-економічних показників кріогенних установок є вдосконалення технологічних схем і конструкції теплообмінних апаратів. На практиці при визначенні інтенсивності теплообміну в нормативних методиках не враховується наявність крапельної рідини в паровому потоці, що призводить до неточності розрахунків. В цій роботі для вдосконалення методики оптимізації конструкції витих теплообмінників пропонується використовувати емпіричні кореляції, які враховують особливості процесів теплообміну та гідродинаміки гомогенних і гетерогенних середовищ.

В нормативній літературі [1] при визначенні коефіцієнта тепловіддачі конвекцією  $\alpha_k$  враховується, що він залежить від компонування теплообмінника, його геометричних характеристик, режимних параметрів, теплофізичних властивостей і температури стінки. При поперечному омиванні коридорних гладкотрубних пучків коефіцієнт  $\alpha_k$ , віднесений до повної поверхні, рекомендовано визначати [1] за формулою

$$\alpha_k = 0,2C_S C_Z (\lambda/d) (w \cdot d/v)^{0,65} Pr^{0,33}, \quad (1)$$

де  $C_S$  — поправка, що враховує крокові;

$C_Z$  — поправка на число рядів по ходу теплоносія;

$\lambda$  — коефіцієнт теплопровідності рідини, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$d$  — зовнішній діаметр теплообмінної труби, м;

$w$  — середня швидкість у вузькому перерізі пучка, м/с;

$v$  — кінематичний коефіцієнт в'язкості, м<sup>2</sup>/с;

$Pr$  — число Прандтля для теплоносія.

Теплофізичні властивості та  $Pr$  визначаються за середньої температури теплоносія у пучку.

Використання формули (1) для розрахунку витих теплообмінників є не зовсім коректним, враховуючи особливості гідродинаміки течії у міжвитковому просторі витого теплообмінника. Розглядаючи рух теплоносія в кільцевому каналі, в якому розташований витий теплообмінник, необхідно

враховувати характерну особливість гідродинаміки потоку: робоче тіло зберігає основний напрям руху вздовж осі теплообмінника, водночас на нього діють також відцентрові сили внаслідок криволінійної поверхні витої труби. Вита теплообмінна поверхня, що обмежена зовнішньою та внутрішньою стінками кільцевого каналу, взаємодіє не тільки з осьовим потоком теплоносія, але й з частиною закрученого потоку. Врахування наведених факторів дозволяє коректніше проводити оптимізацію конструкції теплообмінника.

Для визначення впливу на інтенсивність теплообміну режимних параметрів теплоносія і геометричних характеристик конструкції витога теплообмінника у [2] нами було проведено комплекс експериментальних досліджень, за результатами яких були отримані кореляції для випадків використання гомогенного теплоносія:

— для локального теплообміну

$$Nu_x = 302,71 Re_x^{0,5} Pr^{0,33} (d/x)^{0,5} \varepsilon_{кр} \varepsilon_3; \quad (2)$$

— для середнього теплообміну

$$\overline{Nu} = 25,47 Re^{0,5} Pr^{0,33} (d/l)^{0,5} \varepsilon_{кр} \varepsilon_3, \quad (3)$$

де  $Nu_x = \alpha \cdot x / \lambda$ ;  $Nu = \alpha \cdot d / \lambda$ ;

$Re_x = w \cdot x / \nu$ ;  $Re = w \cdot d / \nu$ ;

$x$  — координата перерізу, в якому визначається локальне значення, м;

$l$  — довжина теплообмінної поверхні, м;

$\varepsilon_{кр} = -0,022\sigma_2^2 + 0,192\sigma_2 + \sigma^*$  — поправка, що враховує вплив крокових характеристик трубного пучка на параметри процесу теплообміну;

$\sigma^* = 8,9 \cdot 10^{-4} Re^{0,885}$ ;

$\varepsilon_3 = 1,26(\delta_3^*)^{0,2}$  — поправка, що враховує вплив величини зазору між поверхнею труби, корпусом і внутрішньою вставкою трубного пучка на параметри процесу теплообміну;

$\delta_3^* = d/D_e$  — безрозмірна товщина зазору;

$D_e$  — еквівалентний діаметр кільцевого каналу, м.

Кореляції (2), (3) були отримані для умов використання гомогенного теплоносія. Характерною особливістю трансформації параметрів теплоносія в обладнанні криогенних установок, які працюють за циклом J-T, є те, що змінюється не тільки його температура і тиск, а також агрегатний стан: від рідини до вологої пари. Вологовміст теплоносія може становити 30% і більше. Наявність крапель рідини у вологій парі суттєво змінює кінетику процесу теплообміну між поверхнею і теплоносієм, тому необхідно розглядати такі варіанти процесу:

- 1) весь спектр крапель рухається разом з парою вздовж поверхні теплообміну, не контактуючи з нею;
- 2) відбувається контакт крапель з теплообмінною поверхнею і утворюється плівка рідини;
- 3) проміжний випадок, коли одна частина крапель рухається з парою, а інша утворює плівку.

Наскільки інтенсивність теплообміну буде залежати від вологовмісту і дисперсності крапель за розміром, визначається для кожного з цих варіантів.

У першому випадку для визначення інтенсивності теплообміну між парою і теплообмінною поверхнею можна користуватися кореляціями (2), (3).

У другому випадку краплі рідини, на відміну від процесу вимушеної конвекції між парою та теплообмінною поверхнею, рухаються разом з потоком пари і мають невелике значення відносної швидкості, величина якої залежить від балансу масових і сил гідравлічного опору. Для визначення інтенсивності процесу випаровування крапель рекомендується використовувати такі кореляції [1]:

— для теплообміну

$$Nu = 2 + 0,6 Re^{0,5} Pr^{0,33}; \quad (4)$$

— для масообміну

$$Nu_D = 2 + 0,57 Re^{0,5} Pr_D^{0,33}, \quad (5)$$

де  $Nu = \alpha \cdot d_{кр} / \lambda_{п}$ ;

$Re = w_{кр} \cdot d_{кр} / \nu_{п}$ ;

$d_{кр}$  — діаметр краплі, м;

$\lambda_{п}$  — коефіцієнт теплопровідності пари, Вт/(м·К);

$v_n$  — кінематичний коефіцієнт в'язкості пари,  $m^2/s$ ;

$w_{кр}$  — відносна швидкість руху краплі,  $m/s$ ;

$Pr$  — число Прандтля за температурою середовища;

$Nu_D = \beta \cdot d_{кр} / D$ ;

$\beta$  — коефіцієнт масовіддачі, віднесений до різниці концентрацій,  $m/s$ ;

$D$  — коефіцієнт дифузії,  $m^2/s$ ;

$Pr_D = v_n / D$  — дифузійне число Прандтля.

Таким чином, застосовуючи методи чисельного моделювання або зазначених кореляцій визначається інтенсивність процесів тепло- і масообміну між краплею рідини та парою. Враховуючи незначну величину температурного напору, що пов'язано з початковими і граничними умовами, питомих потік маси з поверхні краплі визначається як  $j_{ic} = \alpha \cdot \Delta t / r$ .

У третьому випадку в результаті контакту крапель рідини з витотою поверхнею теплообмінника на ній утворюється плівка рідини, яка створює додатковий термічний опір процесу тепловіддачі від поверхні труби до пари. З іншої сторони, коефіцієнт тепловіддачі від стінки труби до пари згідно з кореляцією (4) буде менше, ніж від стінки до плівки рідини, і визначатиметься як [1]

$$Nu = 0,01 Re_{\delta}^{0,83} Pr^{0,33}, \quad (6)$$

де  $Re_{\delta} = \Gamma / \mu_p$  — плівкове число Рейнольдса;

$\Gamma$  — густина зрошування,  $kg/(m \cdot s)$ ;

$\mu_p$  — динамічний коефіцієнт в'язкості,  $Pa \cdot s$ ;

Враховуючи умови формування плівки з крапель рідини за наявності впливу дотичних напружень потоку пари, її товщина буде знаходитись у межах, близьких до мінімальних значень, яким відповідає кореляція [3]

$$Re_{\delta_{min}} = Re_{\delta_{min0}} + 0,31 \cdot Re^{0,4}, \quad (7)$$

де  $Re_{\delta_{min0}}$  — мінімальне плівкове число Рейнольдса, визначається по вологовмісту теплоносія і мінімальній густині зрошування.

Мінімальна товщина плівки за таких умов її формування визначається як

$$\delta_{min} = 3 Re_{\delta_{min}} / (4g\mu^2).$$

За кількістю рідини у витоту теплообмінному апараті та мінімальною товщиною плівки визначається площа поверхні, на якій утворилась плівка, і подальший тепловий розрахунок виконують за середнім значенням коефіцієнта тепловіддачі з урахуванням сухої та змоченої поверхні.

Таким чином, запропоновані кореляції уточнюють методику розрахунку теплообмінного апарату і дозволяють визначити граничні режими та врахувати реальні параметри двофазного середовища, що дозволяє знайти шляхи поліпшення техніко-економічних показників криогенних установок.

#### ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Безродный М., Барабаш П., Голянд Н. *Гидродинамика и контактный теплообмен в газожидкостных системах*, Київ, Політехніка, 2017.

2. Туз В.О., Лебедь Н. Л., Литвиненко М.П. Багатофакторність процедури оптимізації конструкції витого теплообмінника, розташованого в кільцевому каналі при ламінарному русі. *Енерготехнології і ресурсозбереження*, 2023, № 1, с. 80–91. <https://doi.org/10.33070/etars.1.2023.07>

3. Туз В.О., Лебедь Н.Л. *Гідродинаміка і тепломасообмін газорідинних потоків на капілярно-пористих структурах*: монографія, Харків, ФОП Бровін, 2018.

V.O. Tuz, N.L. Lebed, M.P. Lytvynenko

#### Improving the method of calculating the heat transfer intensity in coiled heat exchangers using two-phase heat carriers

To clarify the methodology for calculating the design parameters of coiled heat exchangers with two-phase heat carriers, the authors propose to consider the particular features of heat transfer and hydrodynamics of homogeneous and heterogeneous media. In order to do this, according to the specified conditions, it is recommended to use the known empirical correlations obtained based on the research results on convective heat exchange during the interaction of two-phase flow in a twisted heat exchanger mounted in an annular channel.

Keywords: twisted heat exchanger, convective heat transfer in annular channels.