

Є.М. Письменний¹, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0001-6403-6596О.І. Руденко¹, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-8541-9710О.П. Ніщик¹, канд. техн. наук, ORCID 0000-0003-1149-1928О.М. Терех¹, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-1320-8594Є.С. Алексєйк¹, канд. техн. наук., ORCID 0000-0003-4889-8879¹Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

ХАРАКТЕРИСТИКИ МІЦНОСТІ ПЛОСКООВАЛЬНИХ ТРУБ З ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ ДЛЯ ДВОФАЗНИХ ТЕРМОСИФОНІВ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО ДІАПАЗОНУ

Розвиток та вдосконалення теплообмінних апаратів та систем охолодження і термостабілізації електронної техніки потребує використання нових високоефективних теплопередавальних елементів, які здатні передавати значні теплові потоки при малих габаритних розмірах. Широкого застосування в якості таких елементів набули двофазні термосифони (ДТС). Завдяки простій технології виготовлення, зручній формі та високим теплоаеродинамічним показникам перспективними для використання в якості корпусів ДТС є плоскоовальні труби. При роботі в низькотемпературному діапазоні внутрішній тиск в ДТС може досягати 4 МПа, тому ключовим є питання міцності. Оскільки дані щодо характеристик міцності плоскоовальних труб відсутні, то це питання потребує дослідження.

В статті представлено результати експериментальних досліджень характеристик міцності плоскоовальних труб з поздовжнім зварним швом, виготовлених із вуглецевої сталі. Для проведення досліджень із таких труб було виготовлено 3 зразки ДТС, заправлених водою. Внутрішній тиск створювався за рахунок підведення теплоти до ДТС. Його величина визначалась за температурою насичення, яка, в свою чергу, знаходилась за показами термометра, встановлених на зовнішній поверхні корпусу ДТС.

Отримані результати показали, що за температур до 210°C і тисків до 19,074·10⁵ Па зміна форми поперечного перерізу ДТС з корпусом із плоскоовальної труби не відбувалась. Збільшення температури та тиску призводило до деформації корпусу ДТС із подальшою його розгерметизацією. При цьому в усіх випадках розгерметизація відбувалась по шву на торці заправного штенгеля. Також були отримані закономірності зміни геометричних розмірів плоскоовальних ДТС в залежності від температури та тиску в графічному вигляді. Отримані дані необхідно враховувати при створенні систем охолодження, термостабілізації та теплообміну на основі плоскоовальних ДТС.

Ключові слова: *характеристики міцності, плоскоовальна труба, двофазний термосифон.*

Вступ

Прагнення розробників різноманітних приладів і апаратів до поліпшення їхніх характеристик у багатьох випадках пов'язане зі збільшенням їхньої потужності при умові збереження або мінімізації існуючих габаритних розмірів, наслідком чого є ускладнення конструкції, та підвищенням температури як окремих тепловідільних елементів, так і всього пристрою загалом.

Усуненню зазначених недоліків, як правило, сприяє поява нових ідей, конструктивних рішень, застосування нових матеріалів і технологій. Що ж стосується неминучого при цьому підвищення температури як окремих елементів, так і всього пристрою загалом, то здебільшого вирішення задачі утримання температури в заданих межах є досить складним, а в деяких випадках ця задача не може бути вирішена за допомогою традиційних засобів.

Практичний досвід показує, що хоча наявні пристрої для охолодження (вентилятори, радіатори, теплопровідні шини, термоелектричні модулі та ін.) широко використовуються [1], у багатьох випадках їхнє застосування не завжди доцільне. Це насамперед пов'язано зі збільшенням маси і розмірів охолоджуваного обладнання, збільшенням витрат електроживлення та часу для обслуговування і складністю ремонту засобів охолодження, шумом під час роботи тощо. Тому пошук нових пристроїв або систем, позбавлених цих недоліків і таких, що дають змогу ефективно відводити теплоту, є актуальною задачею.

Аналіз більш ранніх робіт [2-5], а також публікацій останніх років [6-9], направлених на вирішення цієї задачі, показує, що реалізація завдань ефективного відведення теплоти від тепловідільних елементів, забезпечення оптимальних температурних режимів їхньої роботи, їхньої термостабілізації, а також передачі теплоти між теплоносіями та її утилізації, може бути вирішена за допомогою теплопередавальних елементів випаровувально-конденсаційного типу, з яких найпростішими та, відповідно, найдешевшими під час виробництва та в експлуатації є двофазні термосифони (ДТС). Висока теплопередавальна здатність і

низький термічний опір цих пристроїв дають змогу істотно підвищити ефективність систем охолодження, зменшити їхню масу та габарити, а також розв'язувати різні завдання відведення теплоти в обмеженому просторі з метою оптимізації конструктивних рішень різноманітного обладнання з джерелами тепловиділення. Обґрунтоване використання ДТС у багатьох випадках призводить до створення простих за побудовою, але ефективних та надійних систем охолодження та теплообміну, здатних функціонувати автономно в пасивному режимі, тобто без наявності джерел живлення і зовнішнього керування.

Повертаючись до аналізу вищевказаних робіт, необхідно зазначити, що в практиці застосування або досліджень теплотехнічних характеристик ДТС, у якості їхніх корпусів використовувались труби як традиційного круглого поперечного перерізу, так і так звані профільні труби трикутного, прямокутного та іншого поперечного перерізу [1, 3, 6]. Проте застосування профільних труб здійснюється значно рідше, головним чином через значне збільшення металомісткості обладнання з цими трубами, особливо за високих тисків [4]. Тому в більшості випадків перевага надавалась трубам круглого поперечного перерізу як найпоширенішими і найбільш часто вживаними для монтажу, експлуатації або проведення експериментів. При цьому для виготовлення корпусів ДТС у всіх випадках використовувались, як правило, суцільнотягнуті труби.

Відповідно проведеному аналізу асортименту виробів трубокатних підприємств на цей час на ринку доступні профільні труби плоскоовального поперечного перерізу з низьковуглецевої сталі (рис. 1,а). Така форма поперечного перерізу передбачає можливість застосування зварювання як при виготовленні самих труб, так і для прикріплення дискретних сталевих ребер на прямих ділянках їх зовнішньої поверхні (технологію розроблено в КПІ ім. Ігоря Сікорського спільно з ОКТБ ІЕС ім. Є.О. Патона). Застосування зварювання сприяє зменшенню витрат на виготовлення оребрених труб з такою формою поперечного перерізу, причому ця технологічна операція забезпечує практично ідеальний термічний контакт між несучою трубою та оребренням (рис. 1, б).

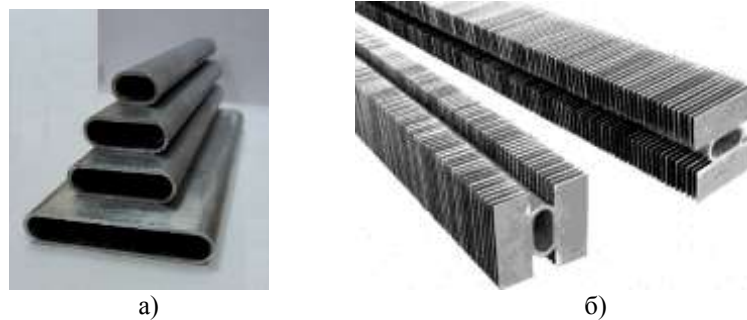


Рисунок 1 - Загальний вигляд плоскоовальних труб: а) без оребрення; б) з поперечним прямокутним оребренням на зовнішніх плоских поверхнях.

Результати досліджень теплоаеродинамічних характеристик таких труб [10-16] і численні приклади їхнього застосування [17-19] засвідчили доцільність використання плоскоовальних труб при виготовленні, наприклад, трубчастих елементів конвективних поверхонь теплообміну, які працюють в умовах підвищених температур і тисків і знайшли широке застосування на низці енергетичних і промислових підприємств України.

У зв'язку з цим, актуальним є питання вивчення можливості використання таких труб у якості корпусів ДТС з урахуванням особливостей, характерних для їхньої роботи в низькотемпературному діапазоні (від - 20 °С до 250 °С) внаслідок відмінностей режимних параметрів функціонування в порівнянні з відомими прикладами застосування плоскоовальних труб, а саме: а) конструктивному виконанні; б) характері та режимах руху робочого середовища; в) параметрах роботи - температурі та тиску. Необхідність визначення можливості застосування труб вказаного профілю в нових умовах функціонування зумовлена тим, що, як впливає, наприклад, з даних [17, 19], температура і тиск води, що рухається в плоскоовальних трубах економайзера-теплоутилизатора, не перевищували 70-80°С і 31,201 - 47,415 кПа, відповідно. В ДТС низькотемпературного діапазону, які є герметичними пристроями, з водою як теплоносієм, температури і тиски можуть досягати 250 °С і близько $4 \cdot 10^3$ кПа, відповідно, тобто, більш ніж у 3 рази за температурою і більше ніж у 84 рази за тиском. Тому необхідно визначити здатність зварного корпусу ДТС із зазначених профільних труб за таких параметрів теплоносія залишатися герметичним.

Як вже зазначалося вище, для практичного використання або досліджень ДТС застосовувались, як правило, суцільнотягнуті труби круглого поперечного перерізу, для яких є достатньо інформації про їхні характеристики, зокрема і про характеристики міцності. На основі експериментальних даних для таких труб розроблено методику розрахунку напружень, що виникають у стінці корпусу труб за різної температури і тиску, яка дає можливість зробити обґрунтований висновок щодо можливості їхнього застосування як

корпусів ДТС. Що стосується труб плоскоовального профілю, то для них подібних досліджень не проводилося. Крім цього, зварні шви по довжині корпусів ДТС з плоскоовальних труб і в місцях з'єднання торцевих пробок з корпусами ДТС можуть бути найбільш слабкими місцями при їх функціонуванні при підвищеній температурі і, відповідно, тиску. Це пов'язано з тим, що в герметичних корпусах ДТС одночасно переміщуються пара і конденсат, тобто, вони за своїми особливостями функціонування близькі до паропроводів, у яких найслабшими елементами, що визначають їхній ресурс роботи, є саме зварні з'єднання (шви). Тому можна припустити, що і надійність роботи ДТС зі зварними корпусами також буде визначатися головним чином надійністю зварних з'єднань.

Як показує аналіз робіт, присвячених розгляду питань надійності випарувально-конденсаційних пристроїв (ДТС [4], теплові труби [20-22]), інформація в них має більше рекомендаційний характер і ґрунтується, здебільшого, на даних, що стосуються необігрівних посудин, що працюють під тиском [23], або на даних, отриманих після проведення гідравлічних випробувань [24]. Об'єктивна інформація, максимально наближена до умов застосування ДТС на практиці, може бути отримана в результаті експериментальних досліджень, наприклад, [25], даних періодичних випробувань або безпосередньо експлуатаційних даних. У зв'язку з цим, результати дослідження характеристик міцності ДТС з плоскоовальних труб в умовах, наближених до умов їхньої експлуатації, можуть бути корисними для спеціалістів, які займаються проектуванням і розробкою різноманітного теплообмінного обладнання з використанням труб вказаного профілю.

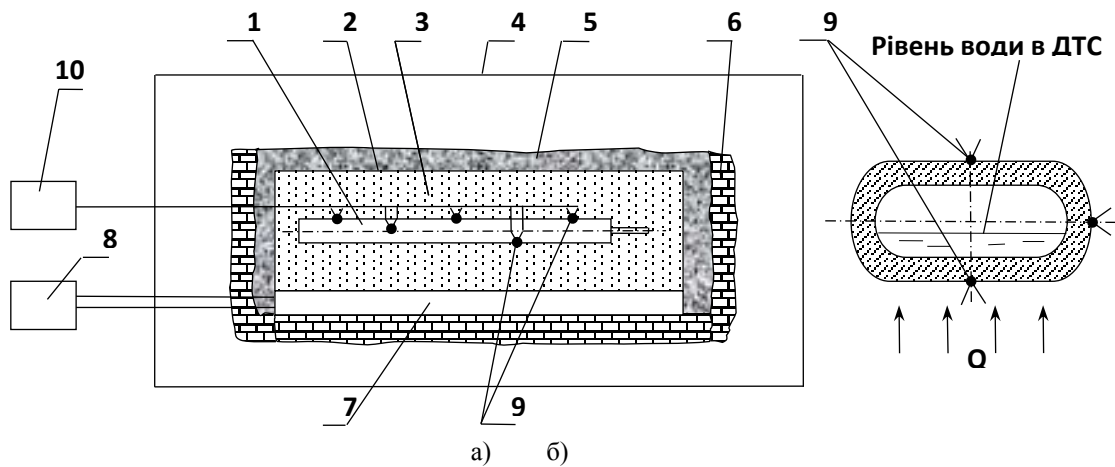
Мета роботи

Метою даної роботи є отримання експериментальним шляхом характеристик міцності плоскоовальних труб з поздовжнім зварним швом без оребрення для визначення їхньої придатності до використання в якості корпусів низькотемпературних ДТС, а також в іншому теплообмінному устаткуванні.

Метод досліджень

Дослідження проводилися з трьома ДТС, виготовленими з вуглецевої сталі 08кп. Геометрія плоскоовальної труби корпусів ДТС, їхня довжина і товщина стінки становили 15x30 мм, 220 мм і 1,5 мм, відповідно. Теплоносій - дистильована деаерована вода, обсяг заправки якої становив 30% від внутрішнього об'єму ДТС. Для складання всіх елементів ДТС (торцевих заглушок з корпусом, заправного штенгеля з торцевою заглушкою у зоні конденсації) застосовували аргоно-дугове зварювання. Заправлення ДТС теплоносієм здійснювали під вакуумом через заправний штенгель, який потім перетискали, а утворений при цьому шов холодного зварювання підсилювали шляхом запаювання його припоєм ПСр-37.

Враховуючи, що температура і тиск, за яких може статися розгерметизація корпусів ДТС заздалегідь невідомі, для досліджень була спроектована та виготовлена експериментальна установка з широким діапазоном зміни цих параметрів, принципова схема якої представлена на рис. 2, а. Кожен із досліджуваних ДТС 1 по черзі розміщувався в піддоні 2, засипався дрібнозернистим середовищем 3 (висушений річковий пісок) та встановлювався у випробувальну камеру 4. Зменшення втрат теплоти в навколишнє середовище досягалося за рахунок використання теплоізоляційних шарів базальтового волокна 5 марки БСТВ-1 і вогнетривкої цегли 6. Підведення теплоти до піддону 2 і до встановлених в ньому ДТС 1, здійснювалося омичним нагрівачем 7, живлення до якого підводилося за допомогою регульованого трансформатора 8 (РНО-250-5).



1 – двофазний термосифон; 2 – піддон; 3 – пісок; 4 – випробувальна камера; 5 – теплоізоляція; 6 – вогнетривка цегла; 7 – нагрівач; 8 – регульований трансформатор; 9 – термопари; 10 – вторинний прилад для вимірювання температури

Рисунок 2 - Схема експериментальної установки (а) і розташування термопар (б) на ДТС

Вимірювання температури стінок корпусів ДТС здійснювалось п'ятьма хромель-копелевими термопарами 9, встановленими в різних перетинах по всій довжині ДТС (рис. 2, а, б) і підключеними до вторинного приладу 10 (А 565-002-01). Усі термопари закріплювались на корпусі ДТС пластинками з мідної фольги, які щільно обмотувались ниткою зі скловолокна.

Під час проведення експериментів періодично вимірювалися температурні поля на зовнішній поверхні ДТС, при цьому інтервал між вимірами визначався дослідним шляхом і становив 5 хвилин, а час опитування всіх п'яти термопар не перевищував (10-15) сек. Між вимірами контроль температури здійснювався постійно за однією з термопар. У випадку виходу з ладу цієї постійно діючої термопари, значення поточної температури в інших точках ДТС у вимірюваному проміжку визначалось шляхом екстраполяції на основі даних про зміну температури у цих точках за період часу, коли ДТС ще зберігали свою цілісність.

Температури, за яких відбувалися випробування ДТС, визначали як середні величини:

$$\bar{t}_i = \frac{\sum_{i=1}^5 t_i}{n}, \quad (1)$$

де t_i - температура поверхні корпусу ДТС у i - тому перерізі, °С; $n=5$ - кількість точок вимірювання (термопар), шт.

При цьому допускалося, що середня температура на зовнішній поверхні стінок корпусу кожного ДТС дорівнює температурі пари теплоносія внаслідок адиабатних умов проведення випробувань та малої товщини стінок. Тиск у внутрішній порожнині ДТС як функція $P=f(t)$ визначався відповідно до рекомендацій [26] на підставі даних про середні температури стінок їхніх корпусів. Настання моменту втрати герметичності корпусів ДТС визначалось за шумовим ефектом (вибухом).

Результати та їх обговорення

Для отримання даних про діапазон температури (тиску) вірогідного руйнування з втратою герметичності корпусів ДТС, виготовлених за ідентичною технологією, були проведені попередні випробування одного з трьох термосифонів (ДТС № 2). Відповідно отриманим результатам, розгерметизація цього термосифона сталася за температури 349,88°С, що відповідає тиску $165,05 \cdot 10^5$ Па. Цей експеримент показав, що внаслідок дії внутрішнього тиску форма і розміри корпусу ДТС № 2 зазнали суттєвих змін. На рис.3 представлено фрагмент поперечного перерізу ДТС № 2 після випробувань, вирізаний з корпусу в середній його частині (рис. 3, б), а також фрагмент поперечного перерізу вихідної плоскоовальної труби (рис. 3, а), з якої були виготовлені корпуси досліджуваних ДТС. Очевидно, що форма поперечного перерізу ДТС 2 під час проведення експерименту змінилася від плоскоовальної (рис.3, а) до овальної з тенденцією до круглої (рис. 3, б). При цьому візуальні дослідження корпусу ДТС № 2 і його перевірка на герметичність показали відсутність будь-яких пошкоджень, поздовжній зварювальний шов на корпусі не зазнав змін і також залишився герметичним, а розгерметизація сталася по шву на торці заправного штенгеля (холодне зварювання та паяння припоєм ПСр-37).

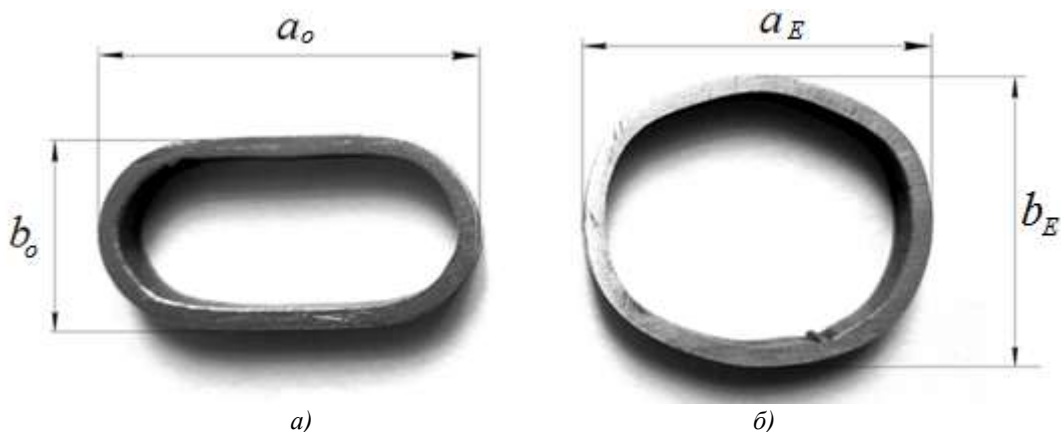


Рисунок 3 - Зміна форми і розмірів поперечного перерізу ДТС № 2: а) до проведення випробувань; б) після його розгерметизації

Наступні випробування, проведені з ДТС № 1 в аналогічних умовах для порівняння з результатами, отриманими для ДТС № 2, показали, що в цьому експерименті втрата герметичності ДТС № 1 відбулася при температурі 373,39°С і тиску $219,16 \cdot 10^5$ Па, а розгерметизація, як і в ДТС № 2, сталася також в заправному штенгелі в місці запакування торця штенгеля припоєм ПСр-37. Як і в ДТС № 2, в ДТС № 1 відбулося подібне змінювання форми і розмірів поперечного перерізу корпусу в середній його частині без

порушення його герметичності. При цьому сам корпус ДТС № 1 не мав якихось різких викривлень форми і, також як і корпус ДТС № 2, набув подібну конфігурацію завдовжки, за винятком місць, наближених до місця зварювання торцевих заглушок із корпусом (мал.4а,б).

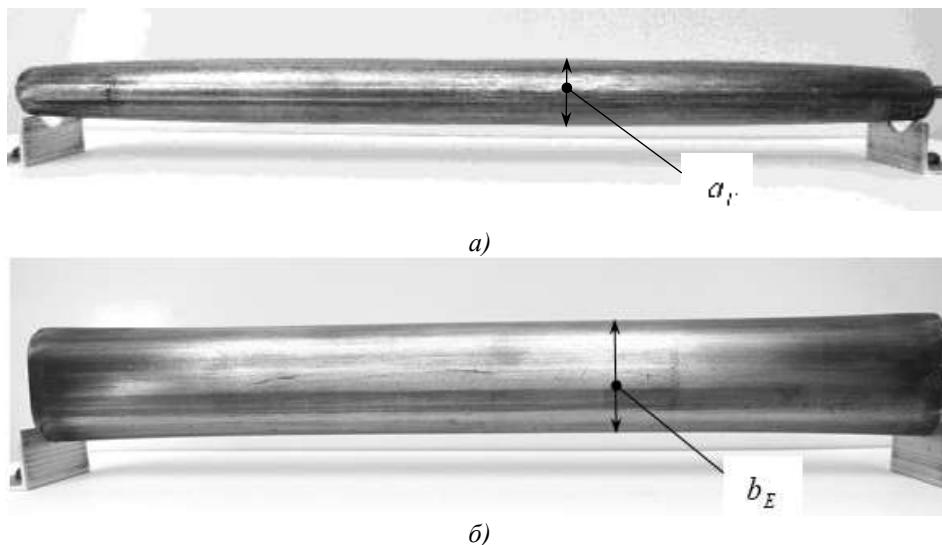


Рисунок 4 - Вигляд ДТС № 1 після випробувань: а) зміни за розміром a_E ; б) зміни за розміром b_E

Проведені дослідження показали, що зміна форми і розмірів поперечного перерізу корпусів ДТС № 1 і ДТС № 2 безпосередньо пов'язана з температурою і, відповідно, тиском у їхній внутрішній порожнині. Тому, щоб визначити характер і зміни геометричних розмірів термосифонів залежно від зазначених параметрів, під час наступних випробувань з ДТС № 3, було проведено періодичні вимірювання розмірів поперечного перерізу корпусу термосифона в середній частині у двох взаємно перпендикулярних площинах під час його поступового нагрівання. Для цього, починаючи з температури поверхні термосифона приблизно 80°C , через кожні $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ДТС № 3 виймали з випробувальної камери, і за допомогою мікрометрів МК 0-25 мм і МК 25-50 мм (ціна поділки 0,01 мм) визначали розміри a_E і b_E (див. рис. 3). З огляду на те, що за час проведення вимірювань (приблизно 1-2 хв.) ДТС № 3 дещо охолоджувався, температури, за яких їх проводили, $t_{ВИМ.i}$ розраховували як середні, зважаючи на дані про температури на початку $t_{ПОЧ.i}$ і наприкінці $t_{КИН.i}$ кожного вимірювання:

$$\overline{t_{ВИМ.i}} = \frac{t_{ПОЧ.i} + t_{КИН.i}}{2} \quad (2)$$

При цьому припускали, що за час вимірювань розміри поперечного перерізу практично не змінюються, оскільки в діапазоні температур ($100 \dots 400^{\circ}\text{C}$) коефіцієнт температурного розширення сталі 08кп незначний і складає $\alpha = (12,5 \dots 14,5) \cdot 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$ [27].

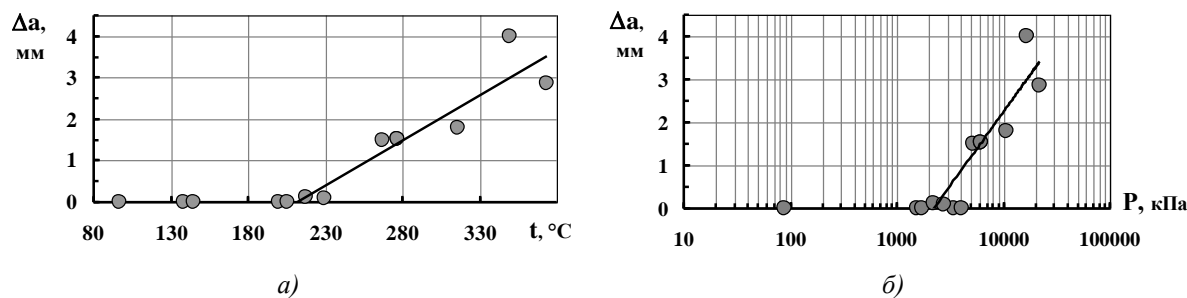
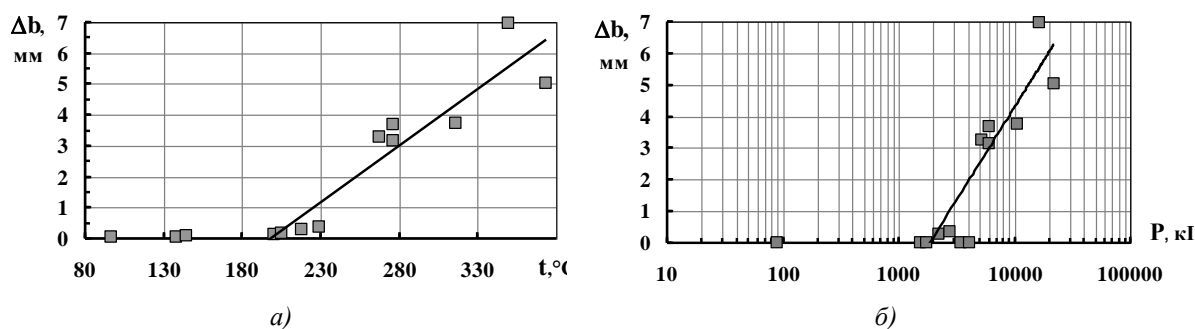
Під час проведення випробувань за такою методикою розгерметизація ДТС № 3 сталася при температурі $316,18^{\circ}\text{C}$, що відповідає тиску $107,24 \cdot 10^5$ Па. Як і в попередніх експериментах з ДТС № 1 і ДТС № 2, втрата герметичності в ДТС № 3 сталася в заправному штенгелі, водночас корпус термосифона не мав жодних ушкоджень, і, як і у випадку з ДТС № 1 і ДТС № 2 прийняв подібну до них форму поперечного перерізу і конфігурацію за довжиною. Найімовірнішою причиною нижчої температури розгерметизації стало те, що вимірювання розмірів ДТС № 3 супроводжувалося неодноразовими циклами нагрівання-охолодження термосифона. Це сприяло тому, що в місці перетискання і паяння припоєм ПСр - 37 у заправному штенгелі могли виникнути залишкові напруження внаслідок різких змін температури і тиску і, відповідно, появи втоми в металі.

Після проведення експериментів з усіма ДТС було проведено порівняння зміни їх розмірів, отриманих після випробувань, з початковими розмірами. На рис. 5, 6 представлено результати такого порівняння у вигляді залежностей:

$$\Delta a = a_0 - a_E = f(t) \quad \text{та} \quad \Delta a = a_0 - a_E = f(P), \quad (3)$$

$$\Delta b = b_E - b_0 = f(t) \quad \text{та} \quad \Delta b = b_E - b_0 = f(P), \quad (4)$$

де: a_0, b_0 - розміри поперечного перерізу корпусів ДТС до початку випробувань, мм., a_E, b_E - розміри поперечного перерізу корпусів ДТС після випробувань за температури $t_{ВИМ.i}$, мм.

Рисунок 5 - Залежності $\Delta a=f(t)$ (а) та $\Delta a=f(P)$ (б)Рисунок 6 - Залежності $\Delta b=f(t)$ (а) та $\Delta b=f(P)$ (б)

Очевидно, що отримані дані про зміну розмірів Δa і Δb залежно від температур і тисків перебувають у задовільній відповідності між собою, що підтверджується їхніми близькими значеннями в точках перегину відповідних залежностей для всіх ДТС. Аналіз отриманих результатів показав, що за температур до $t \approx 210^\circ\text{C}$ і, відповідно, тисків насичених парів теплоносія до $P \approx 19,074 \cdot 10^5$ Па зміна форми поперечного перерізу ДТС з корпусом із плоскоовальної труби не спостерігалася. Подальше підвищення температури і тиску призводять до зміни форми ДТС і геометрії його поперечного перерізу, що необхідно враховувати при створенні систем охолодження, термостабілізації та теплообміну із застосуванням плоскоовальних ДТС.

Визначені закономірності зміни форми і розмірів поперечного перерізу плоскоовальних труб при дії зсередини на їхні стінки тиску дозволили отримати новий спосіб ущільнення труб та пакетів труб в трубних дошках [28], який може бути використаний при виготовленні різноманітного теплообмінного устаткування.

Висновки

Результати проведених досліджень ДТС і подальша їхня перевірка на наявність будь-яких ушкоджень засвідчили, що всі корпуси ДТС в діапазоні температур до $(316-373)^\circ\text{C}$ зберегли свою герметичність, що дає змогу зробити такі висновки:

1. Застосування плоскоовальних труб зі зварним швом як корпусів ДТС для низькотемпературного діапазону ($t \leq 250^\circ\text{C}$; $P \leq 4 \cdot 10^3$ кПа) найдоцільніше за температур до $t \approx 210^\circ\text{C}$ і тисків до $P \approx 19,074 \cdot 10^5$ Па, тому що за цих параметрів зміни форми поперечного перерізу і втрати герметичності ДТС не відбувається.

2. Отримані дані дають підставу вважати, що плоскоовальні труби для корпусів ДТС можна також використовувати при температурах і тисках, що перевищують низькотемпературний діапазон, тобто, за температур $250 \leq t \leq 316^\circ\text{C}$ і тисків $39,76 \cdot 10^5 \leq P \leq 106,98 \cdot 10^5$ Па при застосуванні зварювання під час герметизації заправних штенгелів і урахування зміни форми ДТС і геометрії його поперечного перерізу.

3. Результати, отримані для плоскоовальних труб, виготовлених зварюванням їхніх обичайок, можуть бути також справедливими і для суцільнотягнутих труб аналогічного профілю, що не мають послаблення по довжині корпусу у вигляді повздовжнього шва.

Список використаної літератури

1. Николаенко Ю. Е. Схемные решения организации тепловода от функциональных модулей ЭВМ с помощью двухфазных теплопередающих элементов. *Управляющие системы и машины*. 2005. № 2. С. 29–37.

2. Разработка и совершенствование систем охлаждения энерготехнологических агрегатов цветной металлургии на основе использования замкнутых двухфазных термосифонов / М. К. Безродный и др. *Промышленная энергетика*. 1984. № 2. С. 34–37.

3. Семена М. Г., Гершуни А. Н., Руденко А. И. Характеристики двухфазных термосифонов как элементов теплообменников. *Промышленная энергетика*. 1988. № 4. С. 41–44.

4. Пиоро И. Л., Антоненко В. А., Пиоро Л. С. Эффективные теплообменники с двухфазными термосифонами. К.: Наук. думка, 1991. 248 с.
5. Гершуни А. Н., Нищик А. П. Разработка и внедрение эффективных теплоутилизаторов на основе теплопередающих элементов испарительно-конденсационного типа. *Промышленная теплотехника*. 1997. Т. 19, № 6. С. 69–73.
6. Хайрнасоев С. М., Рассамкин Б. М., Быков В. Е. Исследование тепловых режимов среднетемпературного термосифона для систем утилизации теплоты уходящих газов с температурой более 400 °С. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2014. № 1. С. 89–95.
7. Eidan A. A., Najim S. E., Jalil J. M. Experimental and numerical investigation of thermosyphone performance in HVAC system applications. *Heat and Mass Transfer*. 2016. Vol. 52, no. 12. P. 2879–2893. URL: <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1800-y>
8. Alizadeh M., Ganji D. D. Heat transfer characteristics and optimization of the efficiency and thermal resistance of a finned thermosyphon. *Applied Thermal Engineering*. 2021. Vol. 183. Art. no. 116136. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116136>
9. Gürtürk M., Kale C., Kok B. Investigation of the performance of a new thermosyphon heat pipe design for applications heat transfer from liquid to gas. *Applied Thermal Engineering*. 2020. Art. no. 116520. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116520>
10. Heat transfer of staggered bundles of flat oval tubes in transverse flow / В. А. Кондратиук та ін. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. Vol. 1, no. 8(73). P. 43-48. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.37318>
11. Analysis of experimental data on aerodynamic drag of flat-oval tube bundles / С. М. Письменный та ін. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. Vol. 6, no. 8(78). P. 19-24. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.55529>
12. Analysis and generalization of the experimental data on heat transfer in staggered bundles of flat-oval tubes / V. A. Kondratiuk et al. *International Journal of Energy for a Clean Environment*. 2017. Vol. 18, no. 3. P. 189–202. URL: <https://doi.org/10.1615/interjenercleanenv.2017021912>
13. Aerodynamic and heat transfer characteristics of an oval-shaped tube at different reynolds numbers / Y. V. Zhukova et al. *Heat Transfer Research*. 2020. Vol. 51, no. 15. P. 1383–1397. URL: <https://doi.org/10.1615/heattransres.2020035821>
14. Pis'mennyi E. N. Ways for improving the tubular heaters used in gas turbine units. *Thermal Engineering*. 2012. Vol. 59, no. 6. P. 485–490. URL: <https://doi.org/10.1134/s0040601512060080>
15. Heat transfer of a single drop shaped cylinders in cross flow / О. М. Терех та ін. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. Vol. 1, no. 8(67). P. 27-31. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.20066>
16. Zhukova Y. V., Terekh A. M., Rudenko A. I. Convective heat transfer and drag of two side-by-side tubes in the narrow channel at different Reynolds number. *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2019. Vol. 62, no. 6. P. 756–762. URL: <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-756-762>
17. Руденко А. И., Мезенцева О. А., Терех А. М. Эффективность внедрения инновационного энергосберегающего оборудования на предприятиях ЖКХ Украины. *БІЗНЕСІНФОРМ*. 2014. № 3. С. 220–224.
18. Інноваційне енергозберігаюче устаткування для підприємств теплокомунальної енергетики / О. І. Руденко та ін. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія «Економіка»*. 2016. № 2 (48). С. 228–232.
19. Руденко О. І., Мезенцева О. О., Терех О. М. Економічна ефективність інноваційного енергозберігаючого обладнання для енергетичних і промислових підприємств. *Інноваційна економіка*. 2013. № 3 (41). С. 117–120.
20. Воронин Г. И. Низкотемпературные тепловые трубы для летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1976. 200 с.
21. Технологические основы тепловых труб / М. И. Ивановский и др. М.: Атомиздат, 1980. 160 с.
22. Алексеев В. А., Арефьев В. А. Тепловые трубы для охлаждения и термостатирования радиоэлектронной аппаратуры. М.: Энергия, 1979. 128 с.
23. Чи С. Тепловые трубы. Теория и практика. М.: Машиностроение, 1981. 207 с.
24. Дан П., Рей Д. Тепловые трубы. М.: Энергия, 1979. 272 с.
25. Экспериментальное исследование тепловой трубы для космических аппаратов / А. И. Руденко и др. *Промышленная теплотехника*. 2002. Т. 24, № 6.
26. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. Москва: ГИФМЛ, 1963. 708 с.
27. Шишков М. М. Марочник сталей і сплавів: довідник. вид. 3-є, доповнене. Донецьк, 2000. 456 с.
28. Спосіб закріплення труби в отворі трубної дошки. : пат. 154428 Україна. Опубл. 15.11.2023, Бюл. № 46.

Ye. Pysmenny¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0001-6403-6596

O. Rudenko¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-8541-9710

O. Nishchuk¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-1149-1928

O. Terekh¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-1320-8594

Ye. Alekseik¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-4889-8879

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

STRENGTH CHARACTERISTICS OF CARBON STEEL FLAT-OVAL TUBES FOR TWO-PHASE THERMOSYPHONS OF THE LOW-TEMPERATURE RANGE

The development and improvement of heat exchangers and systems of cooling and thermal stabilisation of electronic equipment requires the use of new highly efficient heat transfer elements capable of transferring significant heat fluxes with small overall dimensions. Two-phase thermosyphons (TS) are widely used as such elements. As a rule, TS casings are made of round, solid pipes, but alternative profiles, such as flat-oval, are also used to improve the overall dimensions and heat transfer characteristics. Due to their simple manufacturing technology, convenient shape and high thermal and aerodynamic performance, flat-oval tubes have broad prospects for use as TS casings. When operating in the low-temperature range, the internal pressure in the TS can reach 4 MPa, so the key issue when using any pipes as TS casings is strength. Since there is no data on the strength characteristics of flat-oval pipes, this issue needs to be investigated.

The paper presents the results of experimental studies of the strength characteristics of flat-oval tubes with a longitudinal weld made of carbon steel. To conduct the research, 3 samples of TS filled with water were made from such pipes. The internal pressure was created by supplying heat to the TS. Its value was determined by the saturation temperature, which, in turn, was determined by the readings of thermocouples installed on the outer surface of the TS casing.

The obtained results showed that at temperatures up to 210°C and pressures up to 19,074·10⁵ Pa, there was no change in the shape of the cross-section of the TS with a flat-oval tube casing. An increase in temperature and pressure led to deformation of the DTS casing with its subsequent depressurisation. In all cases, the depressurisation occurred along the sealing at the end of the filling tube. Also, the regularities of changes in the geometric dimensions of flat-oval TS depending on temperature and pressure were obtained in graphical form. The data obtained should be taken into account when designing cooling, thermal stabilisation and heat transfer systems based on flat-oval TS.

Key words: strength characteristics, flat-oval tube, two-phase thermosyphon.

References

1. Y. Y. Nikolaienko, “Schematic solutions of heat removal organisation from the computer functional modules by means of two-phase heat transfer elements”, *Control Syst. Comput.*, № 2, c. 29–37, 2005.
2. M. K. Bezrodnyi, S. S. Volkov, V. B. Ivanov та V. N. Petrov, “Development and improvement of power technological units cooling systems of non-ferrous metallurgy based on the use of closed two-phase thermosyphons”, *Promyshlennaya Energetika*, № 2, c. 34–37, 1984.
3. M. H. Semena, A. N. Hershuni та A. I. Rudenko, “Characteristics of two-phase thermosyphons as heat exchanger elements”, *Promyshlennaya Energetika*, № 4, c. 41–44, 1988.
4. I. L. Pioro, V. A. Antonenko та L. S. Pioro, *Efficient Heat Exchangers With Two-Phase Thermosyphons*. Kyiv: Nauk. Dumka, 1991.
5. A. N. Hershuni та A. P. Nishchuk, “Development and implementation of efficient heat recovery units based on evaporative-condensation type heat transfer elements”, *Ind. Heat Eng.*, vol. 19, № 6, p. 69–73, 1997.
6. S. M. Khairnasov, B. M. Rassamakin, Y. V. Bykov, “Study of thermal regimes of middle-temperature no-wick heat-pipe for exhaust gases heat recovery systems with temperatures more than 400 °C”, *POWER ENG.: Econ., Technique, Ecol.*, № 1, p. 89–95, 2014.
7. A. A. Eidan, S. E. Najim, J. M. Jalil, “Experimental and numerical investigation of thermosyphone performance in HVAC system applications”, *Heat Mass Transf.*, vol. 52, № 12, p. 2879–2893, March 2016. <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1800-y>
8. M. Alizadeh, D. D. Ganji, “Heat transfer characteristics and optimization of the efficiency and thermal resistance of a finned thermosyphon”, *Appl. Thermal Eng.*, vol. 183, p. 116136, Jan. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116136>
9. M. Gürtürk, C. Kale, B. Kok, “Investigation of the performance of a new thermosyphon heat pipe design for applications heat transfer from liquid to gas”, *Appl. Thermal Eng.*, art. no. 116520, Dec. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116520>
10. V. A. Kondratiuk, O. M. Terekh, O. V. Baraniuk, Ye. M. Pysmennyi, “Heat transfer of staggered bundles of flat oval tubes in transverse flow”, *Eastern-Eur. J. Enterprise Technol.*, vol. 1, № 8(73), p. 43-48, Feb. 2015. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.37318>

11. Ye. M. Pysmennyi, V. A. Kondratiuk, O. M. Terekh, O. I. Rudenko, O. V. Baraniuk, “Analysis of experimental data on aerodynamic drag of flat-oval tube bundles”, *Eastern-Eur. J. Enterprise Technol.*, vol. 6, № 8(78), p. 19–24, Dec. 2015. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.55529>
12. V. A. Kondratiuk, A. M. Terekh, V. A. Rogachov, A. V. Baranyuk, A. I. Rudenko, “Analysis and generalization of the experimental data on heat transfer in staggered bundles of flat-oval tubes”, *Int. J. Energy Clean Environ.*, vol. 18, № 3, p. 189–202, 2017. <https://doi.org/10.1615/interjenercleanenv.2017021912>
13. Y. V. Zhukova, A. M. Terekh, S. A. Isaev, E. N. Pismenny, “Aerodynamic and heat transfer characteristics of an oval-shaped tube at different reynolds numbers”, *Heat Transfer Res.*, vol. 51, № 15, p. 1383–1397, 2020. <https://doi.org/10.1615/heattransres.2020035821>
14. E. N. Pis'mennyi, “Ways for improving the tubular heaters used in gas turbine units”, *Thermal Eng.*, vol. 59, № 6, p. 485–490, May 2012. <https://doi.org/10.1134/s0040601512060080>
15. O. M. Terekh, O. V. Semeniako, O. I. Rudenko, V. A. Kondratiuk, “Heat transfer of a single drop shaped cylinders in cross flow”, *Eastern-Eur. J. Enterprise Technol.*, vol. 1, № 8(67), p. 27–31, Feb. 2014. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.20066>
16. Y. V. Zhukova, A. M. Terekh, A. I. Rudenko, “Convective heat transfer and drag of two side-by-side tubes in the narrow channel at different Reynolds number”, *Doklady Nat. Acad. Sci. Belarus*, vol. 62, № 6, p. 756–762, Jan. 2019. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-756-762>
17. A. I. Rudenko, O. O. Mezentseva, A. M. Terekh, “Efficiency of introduction of innovative energy-saving equipment at the enterprises of the housing and utilities sector of Ukraine”, *Bus. Inform.*, № 3, c. 220–224, 2014.
18. O. I. Rudenko, O. O. Mezentseva, O. M. Terekh, M. M. Vozniuk, “Innovative energy-saving equipment for heat and power companies”, *Scientific Bull. Uzhhorod Univ. Ser. "Econ."*, № 2(48), c. 228–232, 2016.
19. O. I. Rudenko, O. O. Mezentseva, O. M. Terekh, “Economic efficiency of innovative energy-saving equipment for energy and industrial enterprises”, *Innov. Econ.*, № 3 (41), c. 117–120, 2013.
20. G. I. Voronin, *Low Temperature Heat Pipes for Aircrafts*. Moscow: Mashynostroenye, 1976.
21. M. N. Ivanovsky, V. P. Sorokin, B. A. Tchulkov, I. V. Yagodkin, *Heat Pipe Technological Fundamentals*. Moscow: Atomizdat, 1980.
22. V. A. Alekseev, V. A. Arefev, *Heat Pipes for Cooling and Temperature Control of Radio-Electronic Equipment*. Moscow: Enerhyia, 1979.
23. S. W. Chi, *Heat Pipe. Theory and Practice*. Moscow: Mashynostroenye, 1981.
24. P. D. Dunn, D. A. Reay, *Heat Pipes*. Moscow: Enerhyia, 1979.
25. A. I. Rudenko, V. M. Baturkin, S. K. Zhuk, D. N. Olefirenko, “Experimental study of a heat pipe for space vehicles”, *Ind. Heat Eng.*, vol. 24, № 6, 2002.
26. N. B. Varhaftik, *Reference Book on Thermophysical Properties of Gases and Liquids*. Moscow: MEOPML, 1963.
27. M. M. Shyshkov, *Steel and Alloys: A Reference Book. Ed. 3rd, Supplemented*. Donetsk, 2000.
28. Y. M. Pysmennyi, O. I. Rudenko, O. P. Nishchyk, O. M. Terekh, Y. S. Alekseik, L. V. Lipnitskyi, “Method of fixing the pipe in the hole of the pipe board”, Patent of Ukraine 154428, 15 Nov. 2023.

Надійшла: 15.01.2025

Received: 15.01.2025