

УДК: 532.542, 621.643.07

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН РУЙНАЦІЇ ТРУБ В ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТАХ**

**Демченко В.Г., канд. техн. наук, Погорєлова Н.Д., Хоменко М.В.**

*Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, Київ, 03057, Україна*

<https://doi.org/10.31472/tpe.3.2023.3>

*Визначено основні причини пошкодження та руйнування труб теплообмінного обладнання. Розглянуто вплив вібрацій та бафтингу на трубний пучок. Застосовано індукційний метод виявлення можливих причин пошкоджень та їх наслідків. Запропоновано рекомендації по дотриманню правил експлуатації теплообмінного обладнання.*

*The main causes of damage and destruction of pipes of heat exchange equipment have been identified. The influence of vibrations and buffeting on the tube bundle is considered. The induction method of identifying possible causes of damage and their consequences is applied. Recommendations for compliance with the rules of operation of heat exchange equipment are offered.*

Бібл. 15, рис.2, табл. 1.

**Ключові слова:** теплообмінне обладнання, пошкодження труб, вібрація, бафтинг, MicroGroove.

Процеси теплообміну та випарювання широко використовуються в теплоенергетиці та більшості технологічних процесів промислових виробництв. Методологічний аналіз використання теплообмінних апаратів показав, що в багатьох галузях промисловості застосовують різноманітні конструкції цього обладнання, яке виконує одну з провідних функцій і руйнація якого призводить навіть до зупинки технологічного процесу.

Великого розповсюдження здобули кожухотрубчасті апарати, де основною причиною виходу з ладу є пошкодження труб теплообмінника. Причини пошкоджень можуть бути різні, як і їх наслідки та масштаби, усунення яких займатиме різний час та матиме різний ступінь грошових витрат.

Враховуючи значну вагомість в економіці України безпечної експлуатації теплообмінного обладнання, визначення причин його руйнації є актуальною науковою проблемою, вирішенню якої присвячена дана робота.

### **Мета**

**Метою** роботи є визначення та дослідження найбільш розповсюджених причин пошкодження та руйнації трубних теплообмінних поверхонь, які використовуються в кожухотрубчастих теплообмінних апаратах (далі по тексті ТА) та подальшого надання рекомендацій по запобіганню їх пошкодження та руйнації.

Для досягнення мети необхідне:

- визначення впливу технологічних, технічних та виробничих факторів на працездатність труб в ТА;

- дослідження причин пошкоджень та руйнації труб в ТА;

- надання рекомендацій з безпечної експлуатації.

**Об'єкт досліджень** – трубні теплообмінні поверхні.

**Предмет досліджень** – причини пошкоджень та руйнації труб теплообмінних апаратів.

### **Причини пошкодження та руйнування труб теплообмінного обладнання**

Найбільш розповсюджені причини пошкодження та руйнування трубної поверхні ТА можна згрупувати за технологічним, технічним та виробничим факторами, які приведені в таблиці 1.

До технологічних факторів віднесемо помилки, що допущені при проєктуванні та виготовленні, при підборі матеріалів та виборі геометрії труби. До технічних факторів - виникнення градієнта температур, появу концентраторів напружень та порушення умов використання, відповідних до паспорту обладнання. До виробничих факторів - якість транспортування, монтажу та експлуатації.

Таким чином, приходимо до висновку, що основними причинами утворення пошкоджень матеріалу трубної поверхні ТА є руйнування стінок труб внаслідок втоми матеріалу через радіальні коливання, що виникають при пульсації тиску робочої рідини в трубах, та розрив стінок труб внаслідок наявності в матеріалі металургійних, виробничих і експлуатаційних дефектів.

Таблиця 1. Причини пошкодження та руйнування трубної поверхні ТА

№	Причини виникнення тріщин та руйнувань трубної поверхні ТА	Опис причини пошкодження та руйнування	Посилання на джерела
1	Технологія виготовлення	Руйнування внаслідок недотримання технології при виготовленні окремих трубок.	[1, 2]
2	Відповідність матеріалів	Руйнування внаслідок фізико-механічних особливостей матеріалу труби (межі міцності та межі текучості матеріалу).	[1, 2]
3	Геометрія труби	Геометрія поверхні стінок труби, що може призводити до виникнення концентраторів напружень та виникнення тріщин під дією імпульсного навантаження.	[3]
4	Гradient температур	Руйнування трубки у зв'язку з виникненням gradientу температур між зовнішньою та внутрішньою поверхнею.	[3, 4]
5	Концентратори напружень	Накопичення мікропошкоджень у зв'язку зі втомою матеріалу та повторно-змінних навантажень.	[2, 5]
6	Невідповідність використання ТО	Руйнування внаслідок недостатньої кількості статистичних даних щодо експлуатаційних характеристик даної конструкції.	[1, 6]
7	Транспортування	Руйнування внаслідок деформування при транспортуванні конструкції.	[7]
8	Монтаж	Руйнування у зв'язку з порушенням технології складання ТО.	[4]

### **Вплив технологічних факторів**

Аналізуючи причини виникнення пошкоджень та руйнувань трубної поверхні ТА, першою та найрозповсюдженішою причиною є наслідки проектування та технології виготовлення. На цих етапах можуть бути допущені помилки та порушені якісні показники, які призведуть до появи тріщин в трубах та подальшого їх руйнування, що виведе з ладу ТА.

Проектування ТА для енергетичних підприємств ґрунтується на знаннях, накопичених з минулого досвіду. Неefективність конструкції ТА своєю чергою тягне за собою його неefективне використання, що призводить до створення аварійних ситуацій на виробництві. Причиною помилок в проектуванні є складність процесів тепломасообміну в технологічному обладнанні. Зазвичай кожухотрубчасті ТА працюють в умовах турбулентного потоку, де вихрові рухи рідини (вихори) на різних довжинах і діапазонах часу сприяють змішуванню та перенесенню імпульсу, теплоти та маси теплоносія.

Найважливішим елементом конструкції ТА є трубний пучок. Компонування трубного пучка охоплює як

власне його конфігурацію в межах трубної дошки та в рідиннофазовому просторі, так й компактність, глибину та щільність, які характеризують розміщення трубок. Від правильно обраного компонування трубного пучка залежить ефективність роботи апарату з точки зору мінімізації гідравлічного опору й рівномірності розподілу параметрів процесу теплообміну.

Найбільших механічних пошкоджень трубки ТА можуть зазнати при встановленні та закріпленні в трубний пучок. Необхідно дотримуватись відразу трьох принципів: міцність закріплення, герметичність та легка заміна.

Залежно від способу встановлення труб можуть виникати наступні негативні наслідки:

- розвальцювання труб – при не дотриманні норм товщини стінки виникає злам труби в місці кріплення або порушення герметизації, що виведе з ладу роботу ТА;

- приварювання та припайка – при порушенні температурних норм виникає перегрів матеріалу, який понизить механічні та міцнісні характеристики матеріалу;

- приклеювання та сальникове з'єднання – складність та відносна ненадійність у порівнянні з іншими видами кріплення труб.

Не менш важливим фактором є правильний вибір матеріалу для ТА. Насамперед необхідно дивитись на взаємодію його з речовинами, що будуть використовуватись в роботі. Також враховується практичність, економічність та доцільність того чи іншого матеріалу.

Стандартні матеріали, що використовують для труб: сталь 10, 20, Х8; високолегована сталь та алюмінієві, латунні, титанові, мідні, бронзові сплави. В індивідуальних випадках може використовуватись скло. Останнім часом широкого вжитку в теплообмінниках для конденсації або випарювання, в системах кондиціонування, охолодження та теплових насосах отримали мідні трубки малого діаметра, виготовлені за технологією MicroGroove [8].

При застосуванні металевих труб розповсюдженою причиною майбутнього пошкодження та руйнування є використання матеріалу вже з наявними дефектами, наприклад: великими раковинами на зовнішній або внутрішніх поверхнях, канавками на внутрішній поверхні, рисками. Також причиною появи тріщин та руйнації конструкцій труб може бути занадто висока температура при виробництві, зокрема, перегар металу [9].

Використання матеріалу низької якості призводить до корозії, швидкої втоми та подальшого пошкодження поверхні труб або невідповідності необхідній теплопровідності через стінку, що погіршує в цілому роботу ТА.

Наступний фактор – особливість геометрії труб, оскільки вона безпосередньо впливає на працездатність трубного пучка ТА. За численними дослідженнями [10] встановлено, що зміна форми поперечного перерізу труби може бути вирішальним фактором у швидкій втомі матеріалу стінок труб, що надалі призводить до їх пошкоджень та руйнації під час роботи.

Зміни в стандартизації труб можуть як покращити, так і погіршити умови їх використання. Наприклад, при зміні геометрії труби (прогину) зменшиться її внутрішній прохідний перетин, що своєю чергою призведе до зміни швидкості потоку, утворення конденсату, закорковування трубки тощо. Крім того, трубка отримує додаткове напруження оболонки, що негативно позначиться на механічних та міцнісних характеристиках [11].

Розрахунок теплообмінних апаратів напряму залежить від швидкості потоку теплоносія як у середині трубок (поверхні теплообміну), так і в різних зонах

міжтрубного простору апаратів, що розраховується за формулою 1:

$$\omega = \frac{4 \cdot G}{\pi \cdot \rho \cdot d^2}, \quad (1)$$

де  $G$  – продуктивність,  $\pi$  – математична константа,  $\rho$  – густина речовин,  $d$  – алгебраїчний діаметр трубок, який розраховується залежно від поперечного перерізу трубки.

Враховуючи це, приходимо до висновку: чим більша овальність поперечного перерізу труби та пульсація тиску робочої рідини, тим більшої величини досягають напруження в матеріалі її оболонки.

При проектуванні теплообмінних апаратів необхідно дотримуватись правила допустимого тиску, що розраховується за формулою 2 [12]:

$$P \leq \frac{[\sigma] \cdot \delta}{R}, \quad (2)$$

де  $[\sigma]$  – допустиме напруження матеріалу труби,  $\delta$  – товщина стінки труби,  $R$  – зовнішній/внутрішній радіус труби, залежно від розрахунку допустимого тиску в трубному/міжтрубному просторі.

Найбільш розповсюдженими внутрішніми діаметрами труб для ТА вважається 20 і 25 мм, причому товщина змінюється від 1,6 до 2 мм і від 1,8 до 2,5 мм відповідно в залежності від матеріалу.

Останнім часом широке застосування набув такий вид труб як MicroGroove – мідні труби із зовнішнім діаметром не більше 9,5 мм та внутрішнім від 7 мм і менше. Це внутрішньо оребрені трубки, в яких особливості геометрії не дають виникати пристінковим шарам. Вони мають більш високий коефіцієнт теплопередачі, менший загальний розмір, менші витрати матеріалу на виготовлення (економічна вигода) та високу продуктивність системи [8, 13].

Необхідно зазначити, що при однаковій товщині стінки трубки меншого діаметру можуть витримувати вищі тиски, ніж труби більшого діаметра. Це відбувається тому, що робочий тиск прямо пропорційний товщині стінок й обернено пропорційний їх діаметру [12].

Підведемо висновком, що якщо все ж таки ТА потребує зміни в конструкції, то знадобляться додаткові розрахунки та проходження відповідних експертиз перед його виготовленням та дозволом на використання. У міжнародних стандартах по управлінню якістю продукції сформульовані принципи й алгоритм створення нових продуктів.

### Вплив технічних факторів. Вплив вібрації та бафтингу

Основною причиною виникнення майже всіх технічних факторів є утворення вібрацій та бафтингу в міжтрубному просторі теплообмінного обладнання внаслідок коливання трубок ТА при будь-яких режимах роботи.

Одним з механізмів збудження вібрації трубок в потоці є утворення вихорів під час роботи апарату. Найбільш яскраво це проявляється на одинарних трубках, що обтікають поперечним потоком рідини або газу. Коливання виникають в результаті формування та відриву вихорів з бічних поверхонь трубок. Наприклад, зрив вихору з бічної твірної трубки викликає падіння тиску в зоні зриву, внаслідок чого трубка переміщується в бік зони зі зменшеним по контуру тиском, тоді як саме переміщення трубки викликає новий зрив вихору і трубка повертається назад. Завдяки такому процесу підтримуються коливання трубки поперек потоку теплоносія. Частота зриву вихорів значною мірою залежить від відстані між сусідніми трубками в пучку і від його компонування, що необхідно враховувати при проектуванні теплообмінника. Вібраційне збудження труб розраховується за такими механізмами:

1. *Пружно-пружна нестабільність.* Окремі трубки трубного пучка пружно з'єднані одна з одною через рідину між ними, як за допомогою пружин. Характерним є раптове, дуже велике збільшення амплітуди на критичній швидкості потоку. Короткочасне пошкодження виникає внаслідок порушення з'єднання труби з трубною решіткою, ударів трубок по сусідніх трубках та ударів труб об перегородки.

2. *Вихрове збудження.* Частота вихрових розривів передбачає величину власної частоти вібрації труб. Розраховуються амплітуди окремих мод вібрації та зважаючи на максимальна амплітуда. Довготривале пошкодження

виникає через удари труб об перегородки, пошкодження з'єднання труб із трубною решіткою та втомні руйнування.

3. *Турбулентне збудження.* Довгострокове пошкодження відбувається через стирання та знос труб на перегородках.

Приклад для всіх трьох механізмів збудження наведено на рисунку 1.

Можна зробити висновок, що вібрація трубок, яка викликається зривом вихорів, може бути небезпечною у разі обтікання потоком теплоносія одинарних трубок і пучків з великим кроком. Причому в пучку зрив вихорів спостерігається тільки на декількох перших по потоку рядах трубок.

Гідропружна нестійкість, як механізм збудження вібрації трубок при поперечному обтіканні, виникає при більш високих швидкостях потоку, ніж зрив вихорів. Максимальну швидкість, при якій може проявитися цей механізм, називають критичною, і залежить вона від геометрії пучка, характеристик теплоносія та характеристики демпфірування трубок (гасіння коливань або зменшення їх амплітуди). Швидкість потоку, яка перевищує критичну, викликає коливання з великою амплітудою, що протягом порівняно короткого часу в більшості випадків призводить до їх пошкодження.

Порушення трубок турбулентними пульсаціями тиску відбувається практично у всьому діапазоні зміни швидкості потоку і при будь-яких умовах їх обтікання. Збуджуюча гідродинамічна сила має широкосмуговий частотний спектр та її вплив на трубки має випадковий характер, що описується тільки ймовірнісними методами.

Невідповідність теоретичних уявлень експериментальним результатам в питанні про вплив частотного розладу на величину критичної швидкості свідчить про наявність додаткових гідродинамічних явищ. Відзначається, що пропорційна залежність між

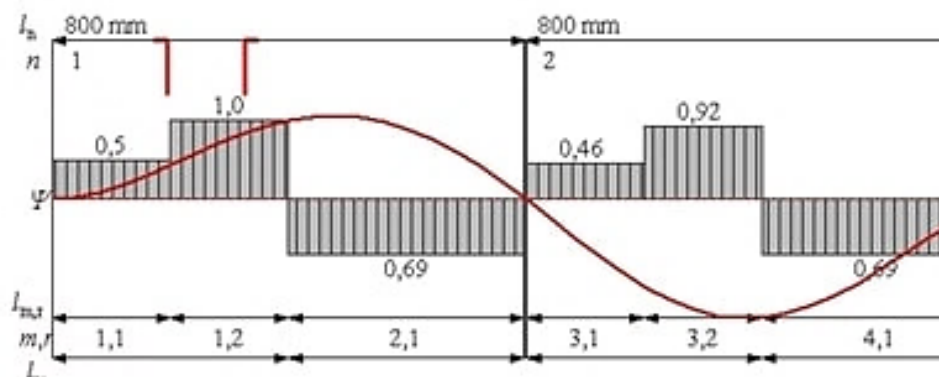


Рис. 1. Розподіл поперечних швидкостей і режим вібрації [14]

критичною швидкістю і демпфіруванням не завжди підтверджується. Конструкційне демпфірування впливає на поріг нестабільності набагато меншою мірою, ніж передбачено розрахунками.

Ще одним механізмом, що викликає коливання трубок теплообмінників, є так званий турбулентний бафтинг [15]. Під бафтингом розуміють стохастичне (випадкове) гідропружне збудження коливальної системи внаслідок її взаємодії з турбулентними пульсаціями потоку, що набігає. Крім того, такого роду турбулентні коливання швидкості розподілені по всій ширині спектра частот. І коли вони накладаються на середню швидкість потоку, то з'являються супутні струмені потоку за трубами перших рядів трубного пучка.

При цьому трубки працюють як механічний фільтр для турбулентних пульсацій, «резонуючи» на частотах, близьких до власних, а амплітуда коливань трубки відповідно збільшується. Типовою ознакою коливань, порушених турбулентними пульсаціями, є майже квадратичне збільшення амплітуди при збільшенні швидкості потоку. Необхідно зауважити, що комп'ютерні прикладні програми розрахунку, такі як, зокрема, AVOGARDO, не враховують цього явища - через те, що збудження коливань, описуваних цим механізмом, є суто випадковим процесом.

Основною особливістю дії турбулентного бафтингу в трубних пучках теплообмінного обладнання є те, що механізм діє майже у всьому діапазоні параметрів теплоносія, а сили, що виникли в результаті, не залежать від незначних переміщень трубок. Приклад ігнорування явища турбулентного бафтингу наведений на рисунку 2.

Наочно видно, що відбувся подовжній та поперечний розрив мідної трубки типу MicroGroove. У цьому випадку поширення руйнування по довжині труби мало крихкий характер.

#### ***Вплив виробничих факторів***

При проектуванні ТА розробляється комплект проектної документації, до якого входять технічний паспорт та інструкції з транспортування, монтажу, експлуатації.

Недотримання умов, прописаних в документації (наприклад, перевищення максимально допустимого тиску, швидкості потоку чи використання з несумісними речовинами) призводить до перенавантаження системи, втомленості матеріалу, пошкодження та руйнування труб, що не піддаються ремонту, а потребують повної заміни.

#### ***Рекомендації по запобіганню аварійних ситуацій***

Найбільш дієвими рекомендаціями по запобіганню аварійних ситуацій є вимоги до проектування, виготовлення та експлуатації ТА:

1. Провести перевірку речовин на сумісність з матеріалами теплообмінника перед використанням.
2. Технологічно правильно проводити заповнення водяного контуру, а саме: не допускати потрапляння повітря в контур.
3. Уникати кавітації насоса водяного контуру та присутності в ньому газу.
4. Уникати потрапляння сторонніх частинок у водяний контур.



***Рис. 2. Фото труби з подовжнім та поперечним розривом***

5. Уникати перевищення максимальних витрат теплоносія, що може призводити до надмірної вібрації та спричиняти розрив трубок всередині теплообмінника.

6. Не піддавати теплообмінник надмірним зовнішнім вібраціям.

7. Виконання монтажу і практичного використання теплообмінників тільки кваліфікованим персоналом.

8. Використання випарників в горизонтальному положенні (якщо не вказано інше положення), оскільки встановлення з відхиленням від горизонталі може істотно погіршити експлуатаційні характеристики апарату.

9. Не змінювати місцями вхід і вихід речовин, щоб не призвести до погіршення робочих характеристик ТА та/або виникнення надлишкових вібрацій у пучку труб.

Необхідно зазначити, що регулярний огляд, своєчасний ремонт та заміна деталей ТА в разі подовжує працездатність обладнання. Першими ознаками того, що необхідна перевірка на працездатність апарату, є поява опуклостей та вм'ятин на поверхні зовнішніх деталей, помітно зміну їх товщин, зовнішні пошкодження, зростання гідравлічного опору та погіршення показників теплообміну.

Рекомендовано систематично проводити очищення теплообмінних поверхонь від механічних, гідравлічних та термічних причин забруднень - в залежності від показників роботи.

### Висновки

1. Сформовано системний підхід до розв'язання проблем виходу з ладу теплообмінного обладнання, постановки пріоритетних наукових та технічних завдань при його проектуванні та експлуатації.

2. Визначено основні причини пошкодження труб та подальшого їх руйнування, до яких відносяться: помилки при проектуванні та виготовленні, використання невідповідних матеріалів, зміна розташування трубного пучка без урахування вібрації та бафтингу, механічні пошкодження при транспортуванні та монтажі, недотримання правил експлуатації ТА згідно з паспортом тощо.

3. Запропоновано науково обґрунтовані рекомендації щодо запобігання аварійних ситуацій при експлуатації ТА.

4. Наведені приклади руйнування труб кожухотрубчастого ТА з реальної практики його неправильної експлуатації.

### ЛІТЕРАТУРА

1. *Kundu B., Das P.*, Performance analysis and optimization of annular fin with a step change in thickness, *Journal of heat transfer*, 123 (2001) 601-604
2. *Deka A., Datta D.*, Geometric Size Optimization of Annular Step Fin Using Multi-Objective Genetic Algorithm, *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 9 (2017)021013
3. *Yu L.T., Chen C.K.*, Optimization of circular fins with variable thermal parameters, *Journal of the Franklin Institute*, 336 (1999)77-95
4. *Arslanturk C.*, Simple correlation equations for optimum design of annular fins with uniform thickness, *Applied Thermal Engineering*, 25 (2005)2463-2468
5. *Banerjee R.K., Karve M., Ha J.H., Lee D.H., Cho Y.I.*, Evaluation of enhanced heat transfer with in a four row finned tube array of an air cooled steam condenser, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 61 (2012)735-753
6. *Liu J., Jiang Y., Wang B., He S.*, Assessment and optimization assistance of entropy generation to air-side comprehensive performance of fin-and-flat tube heat exchanger, *International Journal of Thermal Sciences*, 138 (2019) 61-74
7. *Kang H.S., Look Jr D.*, Optimization of a thermally asymmetric convective and radiating annular fin, *Heat transfer engineering*, 28 (2007)310-320.
8. *Інтернет ресурс: www.microgroove.net*
9. *Атлас дефектов стали.* Пер. с нем. М. "Металлургия", 1979.
10. *Сусак О.М.* Трубопровідний транспорт газу: підруч. [для студ. вищ. навч.закл.] / Сусак О. М., Касперович В. К., Андрійшин М. П./ – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ. – 2013. – 345 с.
11. *НДР 1.7.1.854* Дослідження теплопередачі при русі двофазних потоків в трубах конденсаторів повітряного охолодження, 2014, Київ, ІТТФ НАН України.
12. *Писаренко Г. С.* та ін. Опір матеріалів: Підручник / Г. С. Писаренко, О. Л. Квітка, Е. С. Уманський; За ред. Г. С. Писаренка. — 2-ге вид., допов. і переробл. — К.: Вища шк., 2004. — 655 с.
13. *G.A. Longo, S. Mancin, G. Righetti, C. Zilio, L. Doretti* (2017) Saturated R134a flowboiling inside a 4.3 mm inner diameter microfintube, *Science and Technology for the Built Environment*, 23:6, 933-945, DOI:10.1080/23744731.2017.1300012
14. *Інтернет ресурс: https://lv-soft.net/softwareprodukte/verfahrenstechnik/waermeuebertrager/good-vibrations-gv*
15. *Інтернет ресурс: https://mash-xxl.info/info/201853/*

## RESEARCH OF THE CAUSES OF PIPE DESTRUCTION IN HEAT EXCHANGER APPARATUS

Demchenko V.G.<sup>1</sup>, Pogorelova N.D.<sup>2</sup>, Khomenko M.V.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, str. Maria Kapnist, 2a, Kyiv, 03057, Ukraine. dr-demch@meta.ua

<sup>2</sup>Chief Designer (Engin.) of the laboratory, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, str. Maria Kapnist, 2a, Kyiv, 03057, Ukraine, n\_pogorelova@i.ua

<sup>3</sup>Leading Engineer, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, str. Maria Kapnist, 2a, Kyiv, 03057, Ukraine, kh\_maryna@ukr.net

<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2023.3>

This article is devoted to issues of accident prevention and safe operation of tubular heat exchangers.

The purpose of the work is to identify and investigate the most common causes of damage and destruction of tubular heat exchange surfaces used in shell-and-tube heat exchange devices (hereinafter referred to as TA) and further provide recommendations for preventing their damage and destruction.

The object of research is pipe heat exchange surfaces.

The subject of research is the causes of damage and destruction of pipes of heat exchangers.

The most common causes of damage and destruction of the TA pipe surface can be grouped by technological, technical and production factors.

Consider the issue of choosing the materials of the pipe bundle, the quality of its installation and fastening. An analysis of the influence of the pipe geometry was made. For the first time, the question of the impact of pipe bending on the safe operation of the heat exchanger was formulated. The procedure for calculating the coolant flow rate and operating pressure is given.

Consider the issue of tube vibration, which is caused by vortex shedding. An example of ignoring the phenomenon of turbulent buffeting, which led to the destruction of the pipe bundle, is given. Examples of pipe destruction of a shell-and-tube heat exchange device from the real practice of its improper operation are given.

A systematic approach to solving problems of failure of heat exchange equipment, setting priority scientific and technical tasks in its design and operation has been formed.

The main causes of damage to pipes and their subsequent destruction have been determined, which include: design and manufacturing errors, use of inappropriate materials, changing the location of the pipe bundle without taking into account vibration and buffeting, mechanical damage during transportation and installation, non-compliance with operating rules.

Scientifically based recommendations on the prevention of emergency situations during the operation of the heat exchange apparatus are offered.

**Key words:** heat exchange equipment, pipe damage, vibration, baffle, MicroGroove.

References 15, fig. 2, table. 1.

1. Kundu B., Das P., Performance analysis and optimization of annular fin with a step change in thickness, *Journal of heat transfer*, 123 (2001)601-604

2. Deka A., Datta D., Geometric Size Optimization of Annular Step Fin Using Multi-Objective Genetic Algorithm, *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 9 (2017)021013

3. Yu L.T., Chen C.K., Optimization of circular fins with variable thermal parameters, *Journal of the Franklin Institute*, 336 (1999)77-95

4. Arslanturk C., Simple correlation equations for optimum design of annular fins with uniform thickness, *Applied Thermal Engineering*, 25 (2005)2463-2468

5. Banerjee R.K., Karve M., Ha J.H., Lee D.H., Cho Y.I., Evaluation of enhanced heat transfer with in a four row finned tube array of an air cooled steam condenser, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 61 (2012)735-753

6. Liu J., Jiang Y., Wang B., He S., Assessment and optimization assistance of entropy generation to air-side comprehensive performance of fin-and-flat tube heat exchanger, *International Journal of Thermal Sciences*, 138 (2019) 61-74

7. Kang H.S., Look Jr D., Optimization of a the rmally asymmetric convective and radiating annular fin, *Heat transfer engineering*, 28 (2007)310-320.

8. Internet resource: [www.microgroove.net](http://www.microgroove.net)

9. *Atlas of steel defects*. Trans. with German M. "Metallurgy", 1979.(in Rus.)

10. Susak O.M. Pipeline gas transport: textbook. [for students higher academic department] / Susak O. M., Kasperovych V. K., Andriyshyn M. P./ – Ivano-Frankivsk: IFNTUNG. - 2013. - 345 p. (in Ukr.)

11. NDR 1.7.1.854 Study of heat transfer during the movement of two-phase flows in tubes of air cooling condensers, 2014, Kyiv, ITTF NAS of Ukraine. (in Ukr.)

12. *Pisarenko G. S.* and others. Resistance of materials: Textbook / H. S. Pisarenko, O. L. Kvitka. E. S. Umanskyi; Under the editorship H. S. Pisarenka. — 2nd ed., supplement. and processing - K.: Vyshcha Shk., 2004. - 655 p. (in Ukr.)

13. *G.A. Longo, S. Mancin, G. Righetti, C. Zilio, L. Doretti* (2017) Saturated R134a flowboilinginside a 4.3 mm innerdiametermicrofintube, Scienceand Technology for the Built Environment, 23:6, 933-945, DOI:10.1080/23744731.2017.1300012

14. *Internet resource:* <https://lv-soft.net/softwareprodukte/verfahrenstechnik/waermeuebertrager/good-vibrations-gv>

15. *Internet resource:* <https://mash-xxl.info/info/201853/>

*Отримано 16.05.2023*

*Received 16.05.2023*

*Прийнято до друку 15.08.2023*  
*Accepted for publication 15.08.2023*