

# ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT IN POWER ENGINEERING

УДК 536.24:66.045.12

DOI 10.20535/1813-5420.1.2022.259193

В.Ю. Ліщишин, аспірант ORCID 0000-0003-4327-3319

М.М. Вознюк, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-2452-2255

М.В. Воробйов, канд. техн. наук, ORCID 0000-0001-9621-7658

Є.М. Письменний, д-р. техн. наук, проф., ORCID 0000-0001-6403-6596

О.І. Руденко, канд. техн. наук, доцент ORCID 0000-0002-8541-9710

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

## КОНТАКТНИЙ ТЕРМІЧНИЙ ОПІР МІЖ ОРЕБРЕННЯМ ТА ТРУБОЮ-ОСНОВОЮ ДЛЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОВЕРХОНЬ ТЕПЛООБМІНУ

*Розроблена експериментальна установка для дослідження контактної термічної опору (КТО) композиційної теплообмінної труби яка виконана з плоскоовальної сталеві труби – основи та алюмінієвого оребріння, які приєднані до основи за допомогою контактної зварювання. Методом прямих вимірювань визначено величину КТО для композиційної теплообмінної труби, яка була порівняна із значеннями КТО для трьох видів біметалевих труб з накатаним алюмінієвим оребрінням: з трубою-основою з вуглецевої Сталі 20, з трубою-основою з нержавіючої сталі 1Х18Н10 та з трубою-основою з латуні. Встановлено, що для композиційної теплообмінної труби середній термічний опір контактуючих поверхонь не залежить від густини підведеного теплового потоку та складає постійну величину  $R_k = 2,75 \cdot 10^{-6} \text{ K m}^2/\text{Вт}$ , тобто для інженерних розрахунків практично дорівнює нулю і їм можна знехтувати. Для композиційної теплообмінної труби застосування технології контактної зварювання унеможливило погіршення термічного контакту між моноребрим і трубою внаслідок температурних коливань у процесі експлуатації теплообмінних апаратів. Отримані результати показують, що композиційна поверхня з привареним алюмінієвим моноребрим має на два порядки менший КТО порівняно з теплообмінними поверхнями з широко розповсюджених біметалевих труб всіх відомих типів. Це забезпечує максимальний коефіцієнт теплопередачі.*

**Ключові слова:** контактний термічний опір, експериментальні дослідження, плоскоовальна оребрена труба, композиційна теплообмінна поверхня, теплопередача, контактне зварювання

### Вступ

Оребрені конвективні теплообмінні поверхні мають широку сферу застосування у якості елементів повітряних конденсаторів, сухих градирень паротурбінних установок теплових та атомних електростанцій, котлів-утилізаторів газотурбінних і паротурбінних установок, водяних економайзерів парових котлів, повітряних калориферів для попереднього підігріву повітря в котельних установках, охолоджувачів мастила, теплообмінних апаратів компресорних станцій газотранспортної системи, конденсаторів холодильних машин великої потужності для харчової та переробної промисловості, центральних кондиціонерів крупних об'єктів та іншого теплообмінного обладнання типу «газ-рідина».

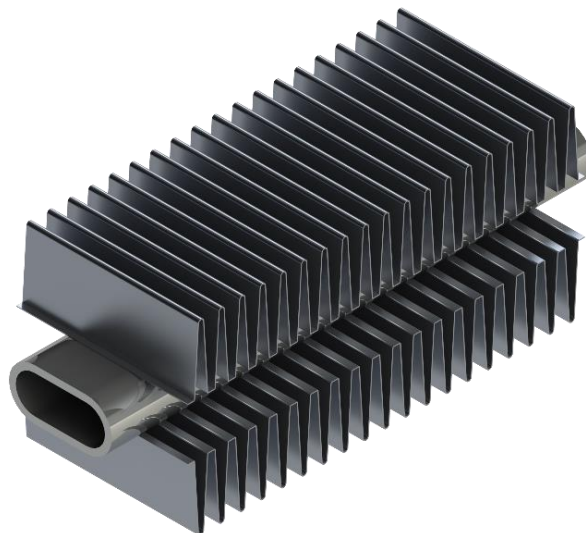
Пошук оптимальної конструкції оребrenних труб є важливою задачею, оскільки підвищення питомого теплового потоку та зменшення аеродинамічного опору апаратів призводить до суттєвого зменшення капітальних та експлуатаційних витрат.

Прототипом нових високоефективних оребrenних труб є композиційні теплообмінні поверхні [1], які розроблені в КПІ ім. Ігоря Сікорського і являють собою сталеві плоскоовальні труби з неповним оребрінням з високотеплопровідного матеріалу – алюмінію, які відповідають зазначеним вище вимогам щодо аеродинамічних та масогабаритних характеристик.

Застосування в конструкції нових оребrenних труб головних принципів особливостей сталевих плоскоовальних труб з неповним оребрінням [2]: плоскоовальної основи, неповного поперечного оребріння, ідеального термічного контакту між оребрінням та трубою-основою потребують пошуку доступного при достатній теплопровідності матеріалу оребріння, вибору конструкції оребріння за

умовами жорсткості та міцності; необхідності застосування сталеві труби у якості основи, обумовленої вимогами до міцності і технологічності.

Так як високу теплопровідність мають матеріали із низькою міцністю (алюміній, мідь, і т.д.), запропоновано застосувати оребрення у вигляді гофрованої стрічки (моноребра) (рис. 1.), що забезпечує достатню для умов транспортування, монтажу і експлуатації жорсткість конструкції оребрення таких труб.



*Рисунок 1 - Композиційна теплообмінна труба*

Для отримання з'єднання труби та моноребер використовується двостороннє контактне зварювання, яке дозволяє приварювати одночасно дві ланки гофрованої стрічки. Така технологія має переваги при виробництві труб з неповним оребренням, що дозволяє забезпечити надійний термічний контакт гофрованої стрічки зі стінкою плоскоовальної труби.

Можливість створення розвиненої теплообмінної поверхні та інтенсифікація теплообміну за рахунок оребрення, виконаного з високотеплопровідних матеріалів, сприяє значному поліпшенню теплотехнічних характеристик теплообмінних апаратів, одночасно забезпечуючи їх каркасну міцність та довговічність. У випадку проектування та виготовлення таких поверхонь, коли несуча труба та ребра виконані з різних матеріалів, приєднаних між собою механічно, наприклад, накатуванням або втискуванням, в зоні їх контакту спостерігається температурний перепад. Це зумовлено наявністю міжконтактного зазору, в якому теплообмін здійснюється за рахунок теплопровідності дискретно розташованих контактних областей (плям), утворених в результаті залишкової шорсткості металевих поверхонь, що з'єднуються та теплопровідності середовища, що знаходиться в зазорі між ними. В зв'язку з тим, що теплопровідність середовища завжди менше контактуючих матеріалів, а площа плям невелика, то в зоні контакту виникає контактний термічний опір (КТО), який в цілому впливає на ефективність роботи теплообмінної поверхні.

Аналіз літературних досліджень в цій галузі показує, що на сьогодні вже існують достатньо надійні методики для розрахунку КТО [3, 4]. Проте, представлені в них розрахункові залежності описують контактний теплообмін переважно для пар з однакових матеріалів і значно рідше для пар з двох матеріалів, що мають різні фізико-механічні властивості. Зокрема, відмінності коефіцієнтів термічного розширення несучої труби та оребрення впливають на величину початкового зазору, який може зростати зі збільшенням робочої температури та збільшуватися протягом певного часу в процесі експлуатації теплообмінної поверхні. Так, в [5, 6, 7] представлені результати досліджень КТО біметалевих труб зі спіральньо-накатаним оребренням, які широко застосовуються в апаратах повітряного охолодження. В біметалевих трубах несуча труба виготовлена зі сталі, а оребрення з алюмінію, при проходженні теплового потоку через зону їх прилягання завжди має місце перепад температури між контактуючими поверхнями. В [8] експериментально досліджено КТО біметалевих труб вітчизняного виробництва, а в [9] отримані результати експериментального дослідження КТО для мідних теплових труб з насадженими на них за допомогою преса ребер з алюмінієвого сплаву.

Крім того, аналіз літературних джерел показав практичну відсутність інформації про КТО у випадку приєднання ребер до несучої труби шляхом зварювання. Як відомо з [5] наявність зварювального з'єднання забезпечує ідеальний термічний контакт між ребрами та трубою, але враховуючи те, що при виготовленні композиційної теплообмінної поверхні відбувається зварювання двох різнорідних матеріалів, було прийняте рішення про перевірку КТО даного з'єднання. Поява термічного опору може

бути пов'язана з неякісним приварюванням поверхні ребер до поверхні труби і як наслідок, утворення в контактній зоні порожнеч та раковин. Всі ці дефекти залежать від якості виконання основних та допоміжних технологічних операцій під час виготовлення поверхні, зокрема, наявності мікронерівностей, хвилястості, прогину плоскоовальної труби, недостатнього притиску ребер до поверхні труби і т.д.

#### **Мета та завдання дослідження**

Метою роботи є визначення контактного термічного опору композиційної теплообмінної поверхні, що має плоскоовальну сталеву трубу – основу та алюмінієве оребрення, які приєднані до неї за допомогою контактної зварювання.

Для досягнення мети дослідження були поставлені наступні задачі:

- Розробити експериментальну установку та методику проведення досліджень;
- Провести аналіз результатів та оцінити характеристики КТО запропонованої теплообмінної труби у порівнянні з КТО для інших видів оребрених теплообмінних поверхонь.

#### **Матеріал і результати досліджень**

На рис. 2 приведений загальний вигляд установки для дослідження КТО композиційної теплообмінної поверхні.



*Рисунок.2 - Експериментальна установка для дослідження контактної термічної опору дослідного зразка композиційної теплообмінної поверхні:*

*1 – дослідний зразок композиційної теплообмінної поверхні; 2 – посуд Дьюара; 3 – прилад живлення постійного струму Б5-44; 4 – модуль реєстрації сигналів термопар “Triton 6004TC”; 5 – комутаційний модуль “Triton C37”; 6 – блок комутації; 7 – мідь-константанові термопари; 8 – дроти живлення електронагрівача*

Дослідний зразок поверхні (1) своєю нижньою частиною у вигляді гладкої неоребреної ділянки міцно закріплений в посуді Дьюара (2) та ретельно теплоізований базальтовою ватою марки БСТВ-1. Оребрена частина поверхні знаходиться ззовні та охолоджується повітрям. Підвід теплоти до ребер здійснюється за допомогою електронагрівача, який розміщується всередині труби і має довжину, що дорівнює довжині оребреної частини поверхні. Таке конструктивне рішення дозволило відводити теплоту через контактну область поверхонь несучої труби та ребер. Живлення електронагрівача по дротам (8) відбувалось приладом з регульованою напругою постійного струму типу Б5-44, яким фіксувалась підведена теплова потужність до електронагрівача шляхом переключення дискретних вимикачів вихідної напруги та струму, встановлених на передній панелі приладу. Сигнали з термопар (7) спрямовувалися через комутаційний модуль “Triton C37” (5) на модуль аналого-цифрового перетворювача (АЦП) та

реєстрації типу “Triton 6004TC” (4). Блок живлення та комутації електродротів установки розміщувався на щиті управління експериментальним стендом (6).

Схема розташування термопар приведена на рис. 3. По одній термопарі (3) розташовувалось на протилежних плоских сторонах труби та закріплювалися на невеликій відстані від зовнішньої поверхні стінки плоскоовальної труби (1) навпроти зони приєднання поверхні моноребра (2) до труби (вид Б), а інші дві термопари (3) на відстані 15 мм між собою розміщалися у заглибленнях в контактній зоні ребра (види Б, В) посередині міжреберного проміжку та притискалися до поверхні ребра алюмінієвою липучою стрічкою (4).

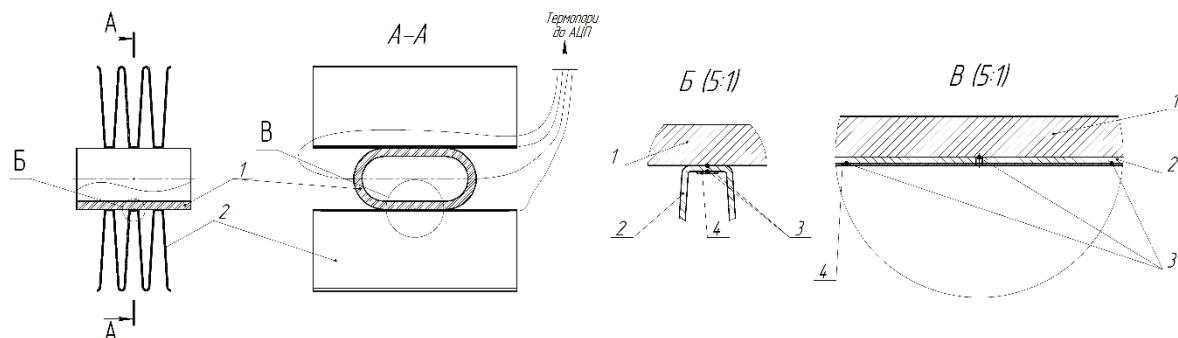


Рисунок 3 - Схема розташування термопар на монорєбрі та стінці труби при дослідженні термічного контактного опору:

1 – стінка плоскоовальної труби; 2 – монорєбро; 3 – термопари; 4 – кріпильна алюмінієва стрічка

На рис. 4 показаний вигляд ребреної поверхні з розташованими на ній вимірювальними термопарами. Для зменшення теплових втрат в навколишнє середовище гладка неоребрена частина плоскоовальної труби ізолювана ватою з базальтового волокна. В дослідженнях використовувалось шість мідь-константанових термопар діаметром дротів 0,08 мм, з них, по три термопари розміщалися симетрично щодо осі труби на діаметрально протилежних сторонах дослідного зразка в зоні контактного зварювального шва поверхонь моноребра та труби.

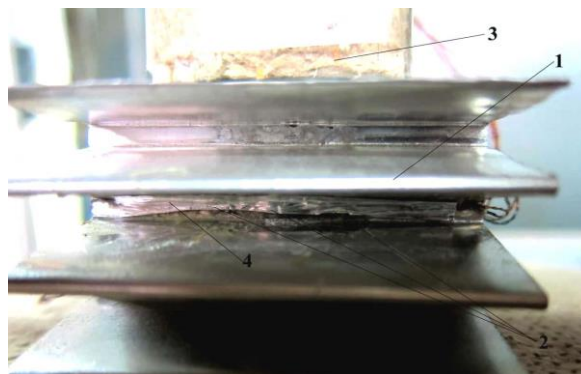


Рисунок 4 - Боковий вигляд дослідного зразка композиційної теплообмінної поверхні:  
1 – монорєбро; 2 – мідь-константанові термопари; 3 – теплоізоляція електронагрівача;  
4 – кріплення алюмінієвої стрічки

Таким чином, методом прямого вимірювання визначались температура стінки труби та середня за двома показами температура біля кореня ребра в області контактуючих поверхонь. На основі отриманих даних обчислювався температурний перепад на контакті в зоні приварювання ребер до труби.

Дослідження КТО проводилось при встановленні стаціонарного температурного режиму для кожного значення підведеної теплової потужності в межах  $Q = (6 - 20)$  Вт. Діапазони температур та густин теплових потоків в зоні контакту відповідно складали  $(35 - 130)^\circ\text{C}$  та  $(15 - 65) \cdot 10^3$  Вт/м<sup>2</sup>К.

На рис. 5 приведені експериментальні дані величин контактної термічної опору в залежності від густин теплового потоку  $q_k$ . На основі первинно отриманих серій максимальних і мінімальних значень термічного опору (точки 1) проведено усереднення даних (точки 2) та побудована апроксимуюча залежність (крива 3). Як видно з рис. 5 середній термічний опір контактуючих поверхонь не залежить від підведеної густини теплового потоку і в зазначеному вище діапазоні  $q_k$  в межах методичних та приладових похибок складає постійну величину  $R_k = 2,75 \cdot 10^{-6}$  К м<sup>2</sup>/Вт.

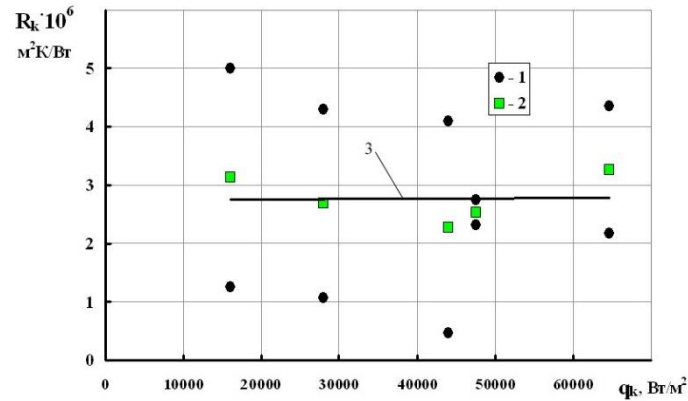


Рисунок 5 - Вплив густини теплового потоку на термічний контактний опір дослідного зразка композиційної теплообмінної поверхні:

1 – дослідні максимальні і мінімальні значення термічного контактного опору; 2 – середні значення термічного контактного опору; 3 – апроксимуюча крива

На рис.6 порівнюються КТО біметалевих труб з накатаними алюмінієвими ребрами, де матеріал труби-основи виконаний з різномірних матеріалів (криві 2, 3, 4) та КТО досліджуваної композиційної поверхні (крива 1) в залежності від середньої температури контакту  $t_k$ . Криві 2, 3, 4, отримані за розрахунковими формулами, що враховують форму (клас) шорсткості контактуючих поверхонь, які приведені в [5]. З аналізу кривих 2, 3, 4 випливає, що найбільші значення КТО відносяться до біметалевих труб (крива 2, основна труба з вуглецевої сталі 20) та змінюються в діапазоні  $R_k = (260 - 360) \cdot 10^{-6} \text{ К м}^2/\text{Вт}$ . Найменший КТО у біметалевій трубі з латунною основою, який змінюється в межах  $R_k = (100 - 165) \cdot 10^{-6} \text{ К м}^2/\text{Вт}$  (крива 4).

В усіх біметалевих трубах спостерігається лінійне зростання КТО із збільшенням температури в зоні контакту, але значно сильніше зростання відбувається у біметалевій трубі з основою з вуглецевої сталі 20 в області температур  $t_k = (100 - 150) \text{ }^\circ\text{C}$  (крива 2). В композиційній теплообмінній поверхні (крива 1), в якій присадання моноребра до основи отримано за принципово іншою технологією контактного зварювання, КТО не залежить від збільшення температури в зоні контакту, а його значення в (100 – 110) разів менше, ніж в біметалевих трубах з накатаним алюмінієвим оребренням.

Складний процес теплообміну в оребрених поверхнях характеризується коефіцієнтом теплопередачі  $K$ , який залежить від багатьох чинників і зокрема від величини термічного контактного опору  $R_k$ . На рис. 7 показаний вплив величини термічного контактного опору на коефіцієнт теплопередачі для різних досліджених поверхонь. Так, збільшення величини термічного опору від  $R_k = 2 \cdot 10^{-4} \text{ К м}^2/\text{Вт}$  до  $R_k = 3,5 \cdot 10^{-4} \text{ К м}^2/\text{Вт}$ , які характерні для біметалевих оребрених труб, призводить до зменшення коефіцієнта теплопередачі  $K$  від 20 % до 30 %. В той же час, коефіцієнт теплопередачі поверхні з алюмінієвим моноребром, яка має на два порядки менший, в порівнянні з біметалевими оребреними трубами КТО (рис. 6), зменшується всього на 0,25 % по відношенню до монолітної оребреної труби, для якої  $R_k = 0 \text{ К м}^2/\text{Вт}$  (рис. 7). Тому при розрахунках теплообміну композиційних теплообмінних поверхонь контактний термічний опір між оребренням і трубою основою можна не враховувати.

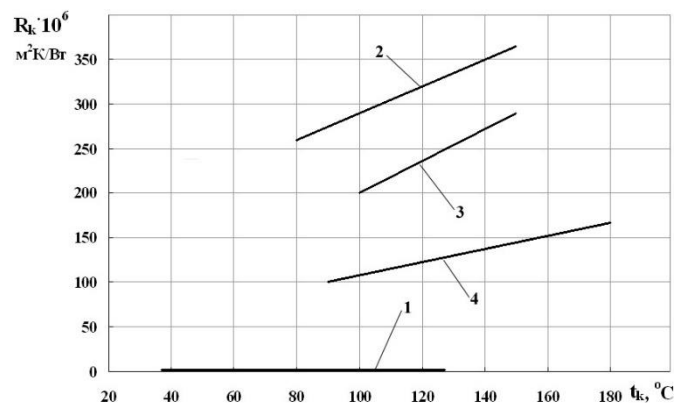


Рисунок 6 - Залежність термічного контактного опору від температури в зоні контакту:

1 – композиційна теплообмінна поверхня; 2 – біметалеві труби з накатаним алюмінієвим оребренням (труба-основа з вуглецевої Сталі 20); 3 – біметалеві труби з накатаним алюмінієвим оребренням (труба-основа з нержавіючої сталі 1X18H10); 4 – біметалеві труби з накатаним алюмінієвим оребренням (труба-основа з латуні)



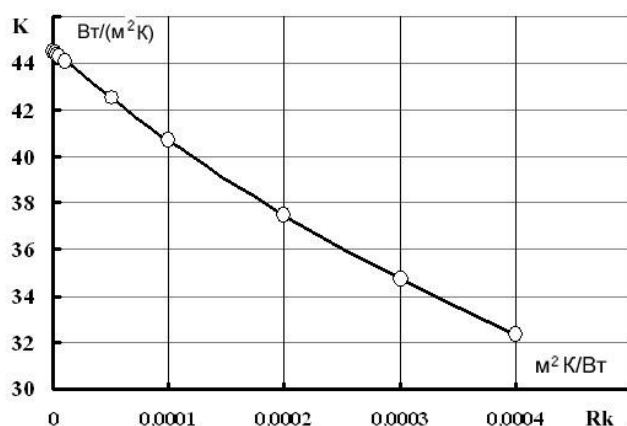


Рисунок 7 - Вплив величини термічного контактного опору на коефіцієнт теплопередачі

З вищенаведеного впливає, що запропонована композиційна поверхня з приварним алюмінієвим монорребром має суттєві переваги, порівняно з теплообмінними поверхнями з широко розповсюджених біметалевих труб.

#### Висновки

Проведені дослідження показали наступне:

- контакт між поверхнями ребра і труби є досконалим, середній термічний опір контактуючих поверхонь не залежить від підведеної густини теплового потоку та практично дорівнює нулю (середнє значення складає  $R_k = 2,75 \cdot 10^{-6}$  Км<sup>2</sup>/Вт), тому, в теплових розрахунках композиційних поверхонь їм можна знехтувати;
- застосування методу контактного зварювання унеможливує погіршення термічного контакту між ребром і трубою-основою внаслідок температурних коливань у процесі експлуатації теплообмінних апаратів;
- композиційна поверхня з приварним алюмінієвим монорребром має на два порядки менший контактний термічний опір у порівнянні з КТО широко розповсюджених біметалевих оребрених труб всіх відомих типів, що забезпечує максимальний коефіцієнт теплопередачі.

#### Список використаної літератури

1. Письменний Є.М., Вознюк М.М., Ніщик О.П., Терех О.М. Композиційна теплообмінна труба / Патент на корисну модель UA 148303. 21.07.2021. Бюл. №29.
2. Pismennyi E.N. Study and application of heat-transfer surfaces assembled from partially finned flat-oval tubes. *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 106. P. 1075 – 1087.
3. Попов В.М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. –М.: Энергия, 1971. 216 с.
4. Кунтыш В.Б., Кузнецов Н.М. Тепловой и аэродинамический расчеты оребренных теплообменников воздушного охлаждения. С-Пб.: Энергоатомиздат, 1992. 280 с.
5. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н. Контактное термическое сопротивление. М.: Энергия, 1977. 328 с.
6. Андрижиевский А.А., Дударев В.В., Сухоцкий А.Б. Тестирование биметаллических ребристых труб по величине термического сопротивления механического контакта несущей трубы и оребренной оболочки. *Труды БГТУ: Химия и технология неорганических веществ*, 2013, №3. С. 166 – 169.
7. Пиир А.Э., Верещагин А.Ю., Миннигалеєв А.Ш. Влияние высокотемпературного прогрева несущей трубы на ТКС БРТ. *Труды РНКТ-5*. 2010. Т.6. С.153 – 155.
8. Руденко А.И. Исследование контактного термического сопротивления для тепловых труб из меди с оребрением из алюминиевого сплава. *Промышленная теплотехника*, 2007, т.29, №4. С.22 – 28.
9. Руденко А.И., Нищик А.П. Исследование контактного термического сопротивления в биметаллических трубах со спирально-накатным оребрением. *Промышленная теплотехника*, 2009, т.31, №5. С. 15 – 19.

V. Lishchyshyn, PhD student, ORCID 0000-0003-4327-3319

M. Vozniuk, Cand. Sc., ORCID 0000-0002-2452-2255

M. Vorobyov, Cand. Sc., ORCID 0000-0001-9621-7658

E. Pismennyi, Dr. Sc., Prof., ORCID 0000-0001-6403-6596

A. Rudenko, Cand. Sc., Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-8541-9710

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

## CONTACT THERMAL RESISTANCE BETWEEN THE FIN AND PIPE-BASE FOR COMPOSITE HEAT TRANSFER SURFACES

*Experimental setup for investigation of contact thermal resistance (CTR) of composite heat-exchange tube, made of flat-oval steel tube – base and aluminum fins, which are connected to the base by means of contact welding, has been developed. By direct measurement, the CTR values for a composite heat exchanger tube are compared to the CTR values for three types of bimetallic tubes with rolled aluminium fins: carbon steel 20 base tube, stainless steel 1X18H10 base tube and brass base tube. It is established that for a composite heat-exchange tube the mean thermal resistance of contacting surfaces doesn't depend on the density of supplied heat flow and makes constant value  $R_k = 2,75 \cdot 10^{-6} \text{ Km}^2/\text{W}$ , that is practically equal to zero for engineering calculations and it is possible to neglect it. For composite heat-exchange tube the application of contact welding technology makes it impossible to deteriorate thermal contact between monorail and tube due to temperature fluctuations in the process of operation of heat-exchange apparatuses. The results obtained show that the composite surface with welded aluminium monofin has two orders of magnitude lower CTR than the heat exchange surfaces made of widely used bimetallic tubes of all known types. This provides the highest heat transfer coefficient.*

**Keywords:** contact thermal resistance, experimental investigations, flat-oval finned tube, composite heat-exchange surface, heat transfer, contact welding

### References

1. E.N. Pismennyi, M.M. Voznyuk, A.P. Nischik, A.M. Terekh, "Composite heat-exchange tube", Patent for utility model UA 148303, 21.07.2021, Bulletin number 29.
2. E.N. Pismennyi, "Study and application of heat-transfer surfaces assembled from partially finned flat-oval tubes", Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 106. P. 1075 – 1087.
3. V.M. Popov, "Heat-exchange in the contact zone of the detachable and indivisible joints", M.: Energia, 1971. 216 p.
4. V.B. Kuntyshev, N.M. Kuznetsov, "Thermal and aerodynamic calculation of finned heat exchangers for air cooling", S-Pb: Energoatomizdat, 1992. 280 p.
5. Yu.P. Shlykov, E.A. Ganin, S.N. Tsarevsky, "Contact thermal resistance", Moscow: Energia, 1977. 328p.
6. A.A. Andrizhievsky, V.V. Dudarev, A.B. Sukhotsky, "Testing of bimetallic finned tubes on the thermal resistance value of the mechanical contact between the carrier tube and the finned shell", Proceedings of BSTU: Chemistry and technology of inorganic substances, 2013, №3. pp. 166 – 169.
7. A.E. Piiir, A.Yu. Vereshchagin, A.Sh. Minnigaleev, "Effect of high-temperature heating of the supporting tube on the TKS of the BRT", Proceedings of the RSCT-5. 2010. Vol.6. pp.153 – 155.
8. A.I. Rudenko, "Investigation of contact heat resistance for heat tubes of copper with Al-alloy finned", Industrial Heat Engineering, 2007, Vol. 29, 4. pp. 22 – 28.
9. A.I. Rudenko, A.P. Nischik, "Research of contact thermal resistance in bimetallic pipes with spiral-rolling fins", Industrial Heat Engineering, 2009, Vol.31, No.5. pp. 15 – 19.

Надійшла 17.01.2022

Received 17.01.2022