

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА  
В ОРЕБРЕННОМ ТРУБЧАТОМ РЕКУПЕРАТОРЕ**

**В.И. Коновалов, Е.В. Романова, А.Н. Колиух**

*Кафедра «Технологические процессы и аппараты»,  
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; kvidep@cen.tstu.ru*

**Ключевые слова и фразы:** интенсификация теплообмена; критериальные уравнения; оребренная поверхность; рекуператор; теплообменный аппарат.

**Аннотация:** Рассмотрена возможность рекуперации тепла с использованием теплообменного аппарата с развитой поверхностью теплопередачи. Предложено техническое решение, позволяющее интенсифицировать теплообмен. Получены критериальные уравнения.

---

Теплообменные процессы играют большую роль во многих энергетических устройствах и технологической аппаратуре. Теплоэнергетика, ядерная и нетрадиционная энергетика, авиационная и ракетно-космическая техника, химические, пищевые и криогенные технологии – лишь некоторые области, в которых интенсивно используются теплообменные аппараты. В большинстве теплообменных аппаратов, применяемых во всех этих отраслях, теплота от горячего теплоносителя к холодному передается через стенку, то есть осуществляется теплообмен между теплоносителем и поверхностью теплообмена. Наиболее низкий теплообмен наблюдается в газовых теплообменниках, и интенсификация теплообмена в таких аппаратах является актуальной задачей.

Области применения интенсификации теплообмена [1]:

- теплообменники котлоагрегатов (воздухоподогреватели, экономайзеры, калориферы, перегреватели, конденсаторы);
- теплообменные устройства АЭС;
- теплообменники систем охлаждения РЭА;
- теплообменные устройства ракетной техники;
- теплообменные аппараты химической и пищевой промышленности;
- теплообменные устройства систем кондиционирования воздуха.

Методы интенсификации можно разделить на пассивные (не требующие прямых затрат энергии), активные (требующие подвода энергии извне) и комбинированные [2–4]. Применительно к течению однофазных теплоносителей используются шероховатые поверхности; развитие поверхности за счет оребрения; закрутка потока завихрителями, установленными на входе в канал; вибрация поверхности; пульсация теплоносителя; воздействие на поток электростатических полей. Высокоэффективным часто оказывается применение комбинированных методов интенсификации (сочетание турбулизаторов с оребрением поверхностей; применение труб с шероховатыми стенками и вставками из витых лент и др.).

Целый ряд работ посвящен поиску эффективных форм поверхностей и различным способам интенсификации конвективного теплообмена [4–11].

*Развитые поверхности*, также называемые ребристыми, обеспечивают увеличение площади поверхности теплопередачи.

К ребристым поверхностям предъявляются следующие требования [12]:

- рекомендуется ребра выполнять из материала с высоким коэффициентом теплопроводности (медь, алюминий);
- оребряется поверхность, имеющая минимальный коэффициент теплоотдачи;
- нецелесообразно делать ребра большой длины (высоты).

В настоящее время применяются теплообменники с ребрами самой разнообразной конфигурации, изготавливаемые по различной технологии [6, 8, 13]. Наиболее распространенные из них: продольное оребрение, выполненное прокаткой или сваркой; поперечное, состоящее из ребристых элементов и дальнейшее их соединение сваркой или пайкой; поперечно-винтовое, выполненное прокаткой или навивкой ленты с различными методами ее крепления на трубе, а также шипы различного профиля для оребрения труб в установках кондиционирования воздуха, калориферах и др.

В результате анализа литературных источников, учитывая требования, предъявляемые к оребренным поверхностям, предложено конструктивное решение теплообменного аппарата. Рекуператор представляет собой теплообменник типа «труба в трубе». С целью повышения интенсивности теплопередачи между холодным воздухом, поступающим в межтрубное пространство, и горячим воздухом, проходящим по внутренней трубе, внутренняя труба выполнена из меди с ребрами, в виде штырей, расположенными в шахматном порядке (рис. 1).

Для проведения исследований создана экспериментальная установка, состоящая из следующих элементов: рекуперативного теплообменника «воздух–воздух» и калорифера для дополнительного нагрева. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.

Вентилятором 1 нагреваемый воздух подается в межтрубное пространство рекуператора 2, противоток по трубному пространству циркулирует нагретый

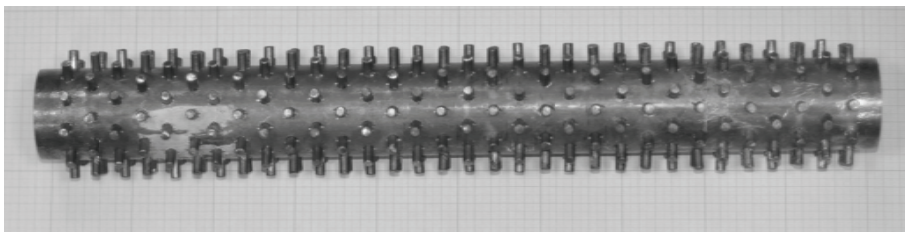


Рис. 1. Внутренняя оребренная труба теплообменника

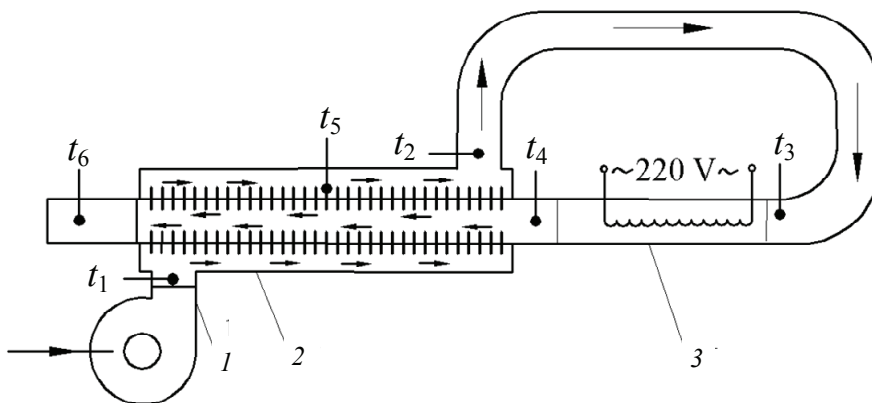


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

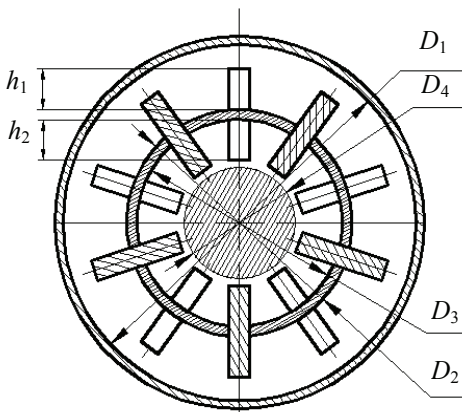


Рис. 3. Теплообменник в разрезе

воздух. Скорость воздуха варьируется в диапазоне от 0,5 до 10 м/с и измеряется прибором Testo 410-1. Мощность нагревателя 3 регулируется от 0,1 до 1 кВт с помощью лабораторного автотрансформатора. Термодатчики  $t_1, \dots, t_6$  подключаются к многоканальному электронному самопишущему прибору Термодат-25М1. Запись значений температуры производилась с помощью самопишущего прибора Термодат-25М1 с регистрацией на персональном компьютере.

Выполненные экспериментальные исследования позволяют найти коэффициенты теплоотдачи и получить следующие критериальные уравнения:

– для межтрубного пространства ( $800 < Re < 10000$ )

$$Nu = 0,037 Re^{0,75} Pr^{0,4} + 0,9 Re^{0,57} \left(\frac{d}{s}\right)^{0,4} \left(\frac{h_1}{D_1 - D_2}\right)^{0,7}; \quad (1)$$

– для трубного пространства ( $800 < Re < 10000$ )

$$Nu = 0,037 Re^{0,75} Pr^{0,4} + 29,1 Re^{0,34} \left(\frac{d}{s}\right)^{0,6} \left(\frac{h_2}{D_3 - D_4}\right)^{0,83}, \quad (2)$$

где  $d$  – диаметр штыря, м;  $s$  – шаг штырей, м;  $h_1, h_2$  – высоты штырей в межтрубном и трубном пространствах соответственно, м;  $D_1, \dots, D_4$  – диаметры труб, м (рис. 3).

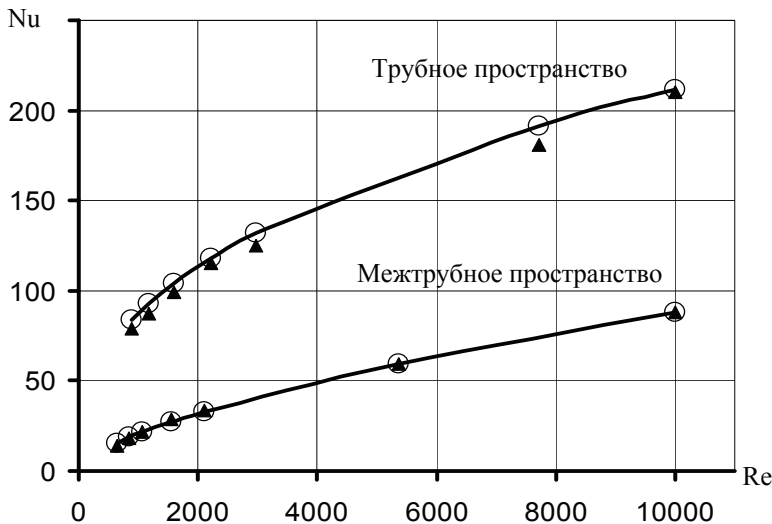


Рис. 4. Зависимость критерия Нуссельта  $Nu$  от критерия Рейнольдса  $Re$  для трубного и межтрубного пространств:

▲ – экспериментальные значения; ○ – расчетные значения для трубного и межтрубного пространства соответственно

Формулы (1) и (2) применимы при  $d/s$  от 0,11 до 0,8;  $h_1/(D_1 - D_2)$  от 0,074 до 0,4;  $h_2/(D_3 - D_4)$  от 0,08 до 0,47.

По уравнениям (1) и (2) были рассчитаны значения критерия Nu для рассматриваемого интервала значений критерия Re. Результаты вычислений и экспериментальные данные показаны на рис. 4.

Результаты экспериментальных исследований и полученные критериальные уравнения могут быть использованы в инженерных расчетах теплообменного оборудования.

#### *Список литературы*

1. Мигай, В.К. Повышение эффективности современных теплообменников / В.К. Мигай. – Л. : Энергия, 1980. – 144 с.
2. Справочник по теплообменникам. В 2 т. Т. 1 / пер. с англ. под ред. О.Г. Мартыненко [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 352 с.
3. Попов, И.А. Промышленное применение интенсификации теплообмена – современное состояние проблемы (обзор) / И.А. Попов, Ю.Ф. Гортышов, В.В. Олимпиев // Теплоэнергетика. – 2012. – № 1. – С. 3–14.
4. Bejan, A. Heat Transfer Handbook / A. Bejan, A.D. Kraus. – Hoboken, N.J. : John Wiley & Sons, Inc. – 2003. – 1427 p.
5. Антуфьев, В.М. Эффективность различных форм конвективных поверхностей нагрева / В.М. Антуфьев. – М.-Л. : Энергия, 1966. – 184 с.
6. Керн, Д. Развитие поверхности теплообмена / Д. Керн, А. Краус. – М. : Энергия, 1977. – 464 с.
7. Эффективные поверхности теплообмена / Э.К. Калинин [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1998. – 408 с.
8. Ройзен, Л.И. Тепловой расчет ребренных поверхностей / Л.И. Ройзен, И.Н. Дулькин ; под ред. В.Б. Фастовского. – М. : Энергия, 1977. – 256 с.
9. Гортышов, Ю.Ф. Теплогидравлический расчет и проектирование оборудования с интенсифицированным теплообменом / Ю.Ф. Гортышов, В.В. Олимпиев, Б.Е. Байгалиев. – Казань : Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2004. – 432 с.
10. Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах / Б.В. Дзюбенко [и др.] ; ред. Ю.А. Кузма-Кичта. – М. : ЦНИИАтоминформ, 2008. – 532 с.
11. Rohsenow, W.M. Handbook of heat transfer / W.M. Rohsenow, J.P. Hartnett, Y.I. Cho. – 3-rd. ed. – N.Y. : McGraw-Hill Professional, 1998. – 1344 p.
12. Тепломассообмен : курс лекций [Электронный ресурс] / М.С. Лобасова [и др.]. – Электрон. дан. (4 Мб). – Красноярск, 2009. – 1 электрон. опт. диск (DVD); 12 см. – Загл. с этикетки диска.
13. Бажан, П.И. Справочник по теплообменным аппаратам / П.И. Бажан, Г.Е. Каневец, В.М. Селиверстов. – М. : Машиностроение, 1989. – 365 с.

---

## **Investigation of Heat Transfer in Ribbed Pipe Recuperator**

**V.I. Konovalov, E.V. Romanova, A.N. Koliukh**

*Department “Technological Processes and Apparatuses”, TSTU; kvidep@cen.tstu.ru*

**Key words and phrases:** criteria equations; heat exchanger; heat transfer; finned surface; recuperator.

**Abstract:** The paper explores the possibility of heat recovery using a heat exchanger with a developed surface of heat transfer. Technical solution to intensify the heat transfer has been proposed. Criteria equations have been obtained.

---

### **Forschung des Prozesses des Wärmeaustausches im gerippten Rohrrekuperator**

**Zusammenfassung:** Es wird die Möglichkeit der Rekuperation der Wärme mit der Ausnutzung des Wärmeübertragenapparates mit der entwickelten Oberfläche der Wärmeübertragung betrachtet. Es wird die technische Lösung, die den Wärmeaustausch zu intensivieren zulässt, vorgeschlagen. Es sind die Kriterialequationen erhalten.

---

### **Etude du processus de l'échange de chaleur dans un récupérateur tubulaire nervuré**

**Résumé:** Est examiné la possibilité de la récupération de la chaleur avec l'emploi de l'appareil de l'échange de chaleur avec une surface développée du transfert thermique. Est proposée une solution technique permettant d'intensifier l'échange de chaleur. Sont reçues les équations de critère.

---

**Авторы:** **Коновалов Виктор Иванович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы и аппараты»; **Романова Елена Васильевна** – аспирант кафедры «Технологические процессы и аппараты»; **Колтух Александр Николаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы и аппараты», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** **Гатапова Наталья Цибиковна** – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Технологические процессы и аппараты», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

---