

# Энергосбережение и энергоэффективность

УДК 621.565.952.78

© Н. Ю. Никулин, канд. техн. наук, доцент  
© Е. О. Шеремет, канд. техн. наук, доцент  
© А. И. Алифанова, ст. преподаватель  
(Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, Белгород, Россия)  
© В. А. Яковлев, канд. техн. наук, доцент  
(Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия)  
E-mail: Nick\_973gt@mail.ru, 66910@mail.ru, pasha9103202296@gmail.com, yakovlevspb@rambler.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2022-19-6-117-124

© N. U. Nikulin, PhD in Sci. Tech., Associate Professor  
© E. O. Sheremet, PhD in Sci. Tech., Associate Professor  
© A. I. Alifanova, senior lecturer  
(Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Russia)  
© V. A. Yakovlev, PhD in Sci. Tech., Associate Professor  
(Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia)  
E-mail: Nick\_973gt@mail.ru, 66910@mail.ru, pasha9103202296@gmail.com, yakovlevspb@rambler.ru

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА ИЗМЕНЕННОЙ ФОРМЫ В КОЖУХОТРУБНОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ

### DETERMINING THE GEOMETRY OF THE MODIFIED SHAPE HEAT TRANSFER SURFACE IN THE SHELL-AND-TUBE HEAT EXCHANGER

В настоящее время уделяется внимание важной задаче в промышленности — повышению коэффициента теплопередачи теплообменников с гладкими трубками. В статье рассмотрен один из способов повышения коэффициента теплопередачи между греющим и нагреваемым теплоносителями в кожухотрубном теплообменном аппарате. Предложен способ, увеличивающий степень турбулентности потока теплоносителя путём оснащения пластины ребрами цилиндрической формы. Представлены исследования, проведённые методом математического моделирования в программе ANSYS Fluent. По результатам математического моделирования выбрана оптимальная схема размещения ребер, позволяющая обеспечить наиболее полное обтекание пластины турбулизированным потоком. Представлены варианты размещения ребер с описанием основных тепловых и гидравлических характеристик потоков теплоносителей.

*Ключевые слова:* теплообменник, поверхность теплообмена, теплообменная трубка, межтрубное пространство.

At present, much attention is paid to an important task in industry, namely, increasing the heat transfer coefficient of heat exchangers with smooth tubes. The article considers one of the techniques to increase the heat transfer coefficient between the heating and heated coolants in a shell-and-tube heat exchanger. The authors propose using the method of increasing the degree of turbulence of the coolant flow by equipping the plate with cylindrical ribs. The results of research carried out by the method of mathematical modeling in the ANSYS Fluent program are presented. Based on the results of mathematical modeling, the optimal rib arrangement has been chosen, which makes it possible to ensure the most complete turbulent flow around the plate. Options for placing ribs with a description of the main thermal and hydraulic characteristics of coolant flows are presented.

*Keywords:* heat exchanger, heat exchange surface, heat exchange tube, inter-tube space.

#### Введение

В настоящее время кожухотрубные теплообменники — широко распространенное теплообменное оборудование. Эти аппараты активным образом используются в теплогенерирующих установках, центральных и индивидуальных те-

пловых пунктах. Также кожухотрубные теплообменники находят применение и в промышленности: нефтегазовой, химической, пищевой, поэтому научные исследования с использованием современных способов и средств с целью выявления их слабых сторон для дальнейшего

повышения тепловой эффективности являются необходимыми [1, 2].

Нами была усовершенствована конструкция кожухотрубного теплообменника, основным отличием которой от серийно выпускаемого теплообменника (ГОСТ 27590–2005) являются трубки, оснащенные пластинами с ребрами (цилиндрической формы) [3]. Эти новые элементы поверхности расположены в межтрубном пространстве аппарата (рис. 1).

Теплообменник разделен на два контура: греющий и нагреваемый. В рассматриваемом аппарате греющая жидкость движется в трубчатом пространстве. Соответственно, движение нагреваемой жидкости происходит в межтрубном, а именно — вдоль трубок с развитой (усовершенствованной) поверхностью теплообмена. При этом важно отметить, что ребра цилиндрической формы выступают турбулизаторами потока (см. рис. 1), а движение жидкости за ребром приобретает вихревую траекторию, становится турбулентно-развитым [4]. Такое течение жидкости в межтрубном пространстве аппарата [3] сокращает у теплообменной пластины толщину ламинарного слоя. А как известно, из-за уменьшения ламинарного слоя теплоотдача к жидкости, обтекающей эту горячую пластину, происходит интенсивнее.

#### Методы

Для теплообменника новой конструкции важно определить оптимальный радиус ребра  $R_0$ ,

который геометрически должен быть таким, чтобы суммарно толщина пластины  $2\delta$  и радиусы обеих ребер  $R_0$  не превышали величину диаметра теплообменной трубки  $D$  (рис. 2) [5]. Следовательно, должно выполняться условие

$$2R_0 + 2\delta \leq D. \quad (1)$$

В настоящее время для систем теплоснабжения наиболее распространены кожухотрубные теплообменники с наружным диаметром трубки 16 мм, что, согласно условию (1), будет соответствовать максимальному значению  $R_0$  — 7,5 мм (с учетом, что  $2\delta = 1$  мм). Однако в теплообменниках, изготавливаемых по заказу потребителя, могут применяться трубки с наружным диаметром 10 мм с величиной  $R_0$ , составляющей не более 4,5 мм. Следовательно, для исследований таких трубок принимаем ребра с радиусами  $R_0$  2, 4, 6 мм.

Поисковые исследования динамики турбулизованной (вихревой) зоны жидкости, которая образуется за ребром, установленным на пластине, проводились с методом вычислительной гидродинамики. Для этого применялся программный комплекс «ANSYS Fluent». Выбраны три вариации поверхности теплообмена с ребрами диаметром  $R_0$ : 2, 4, 6 мм. Моделирование каждой теплообменной поверхности проводилось при скоростях потока греющего теплоносителя 0,1, 0,4 и 0,7 м/с [6, 7].

После проведения исследований с помощью компьютерного моделирования выявлены зоны

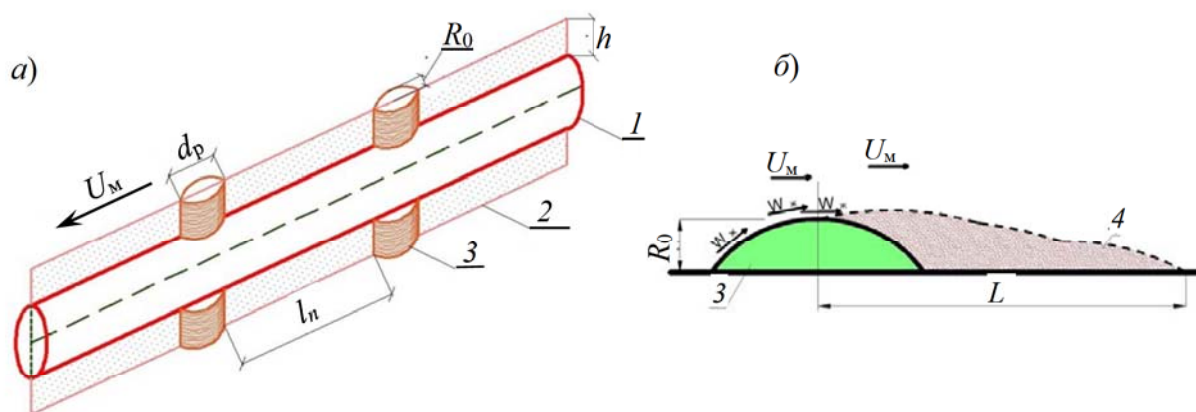


Рис. 1. Поверхность теплообмена кожухотрубного теплообменника: а — теплообменная трубка с пластиной и ребрами; б — зона завихрений (повышенной турбулизации) за ребром цилиндрической формы; 1 — трубка; 2 — пластина; 3 — ребра цилиндрической формы; 4 — зона повышенной турбулизации,  $U_m$  — средняя скорость потока жидкости в межтрубном пространстве теплообменника, м/с;  $R_0$  — радиус ребра,  $d_p$  — диаметр ребра,  $l_n$  — длина пластины между ребрами,  $h$  — высота пластины



потока жидкости с повышенной турбулизацией. Исследования показали, что с увеличением скорости нагреваемой жидкости степень турбулизации после прохождения ребра также повышается. Отношение параметров потока жидкости (см. рис. 1)  $L/R_0$  (при выбранных значениях  $R_0$  2, 4 и 6 мм, а также скоростей в интервале 0,1–0,7 м/с) содержится в границах значения  $12 R_0$ . Важно отметить, что это значение достаточно соответствует результатам исследований профессора А. А. Жукаускаса [8].

В дальнейшем важно выявить схему оптимального взаимного размещения ребер относительно друг друга, расположенных на двух (сопредельно расположенных) пластинах, обусловить расстояние между ребрами [8]. В данной конструкции взаимное размещение ребер возможно по одной из схем:

- в шахматном порядке (ребро одной пластины размещено напротив ребра другой пластины со смещением на полшага) (рис. 3, а);
- в коридорном порядке (ребро одной пластины размещено строго напротив ребра другой пластины) (рис. 3, б).

Следует подчеркнуть, что в конструкции поверхности с ребром  $R_0 = 6$  мм будет наблюдаться следующая динамика нагреваемой жидкости: ребро, которое находится на одной пластине (например, на нижней), будет изменять толщину пограничного слоя возле другой пластины (соответственно, верхней) [9].

Рационально также учесть, что и с выбором ребра  $R_0 = 4$  мм будет возможно влияние ребра одной пластины (например, верхней, см. рис. 3, а) на пограничный слой другой пластины (например, соответственно, нижней, см. рис. 3, а). Это позволит считать схему расположения ребер наиболее оптимальной.

При выборе поверхности теплообмена для кожухотрубного аппарата, представленной на рис. 3, б, с ребрами  $R_0 = 4$  мм и  $R_0 = 6$  мм будем иметь:

- повышение гидравлического сопротивления в межтрубном пространстве теплообменника при условии такого же расстояния между пластинами, как и на рис. 3, а;
- размер прохода для теплоносителя (жидкости) между ребрами будет чрезмерно снижен;
- для осуществления более высокой степени турбулизации потока обязательно потребуется увеличение количества ребер цилиндрической формы на каждый 1 м пластины.

Для последующего изучения потока в межтрубном пространстве аппарата (с поверхностью измененной геометрии) принята расстановка ребер с параметрами  $R_0 = 4$  мм и  $R_0 = 6$  мм. Новая расстановка представлена на рис. 4.

Рационально заключить, что увеличивать радиус ребра целесообразно, несмотря на то что это будет способствовать прогрессированию длины турбулизированного потока [4]. В случае большого увеличения радиуса (поверхность на

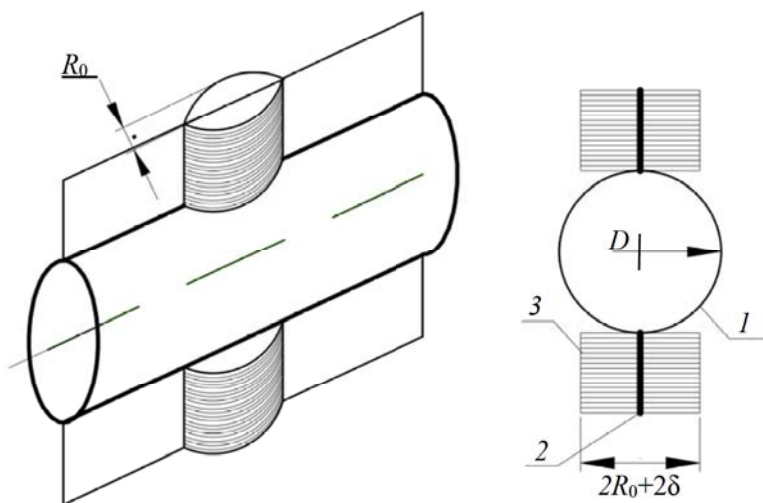


Рис. 2. Поверхность теплообмена: 1 — трубка, 2 — пластина, 3 — ребра цилиндрической формы

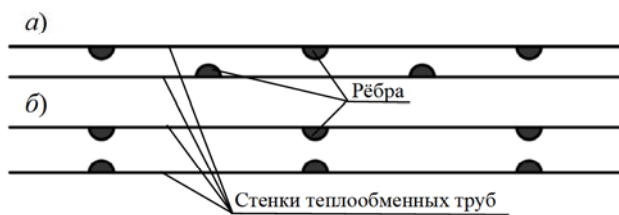


Рис. 3. Поверхность теплообмена аппарата для турбулизации потока: а — расположение ребер в шахматном порядке, б — расположение ребер в коридорном порядке

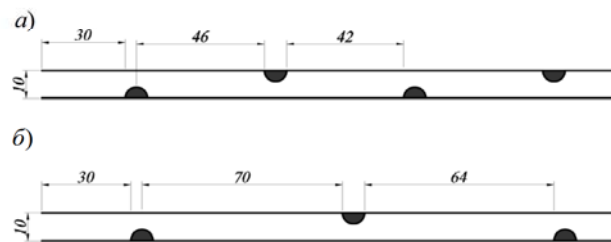


Рис. 4. Расстановка ребер цилиндрической формы: а — с радиусом 4 мм; б — с радиусом 6 мм

рис. 4) будет заужено пространство для прохода потока между ребром и пластиной, а это, в свою очередь, будет способствовать повышению гидравлического сопротивления теплообменника в межтрубном контуре.

Также и сильное уменьшение радиуса ребра снизит протяжённость зоны повышенной турбулизации потока, что приведёт к необходимости увеличения количества устанавливаемых ребер на каждый 1 м пластины. Нам нужно, чтобы на всей поверхности пластины (участок между ребрами) и ребра (следующего после пластины) был организован поток с повышенной турбулизацией, вследствие чего вырастет гидравлическое сопротивление потока, обтекающего эту поверхность, станет меньше высота вихревой зоны (турбулизированного потока). Поток с малой высотой вихревой зоны после ребра уже не сможет повлиять на теплоноситель у пластины, противоположной этому ребру [10].

В заключительном принятии решения о радиусе ребер для поверхности теплообмена (пластина и ребра) при длине теплообменной трубки 1 м (поз. 1 на рис. 1) [11] учтены:

- площадь теплообмена (согласно геометрическим параметрам рис. 4, а также  $R_0 = 4$  мм и  $R_0 = 6$  мм);
- гидравлическое сопротивление;
- объем металла для изготовления.

Результаты проделанных расчетов сведены в табл. 1.

Принимая в расчет площадь теплообмена рассматриваемой поверхности (табл. 1), размер пространства между ребром и пластиной для прохода жидкости и возможность влияния ребра одной пластины (например, верхней) на пограничный слой другой пластины (например, соответственно, нижней), уместно далее рассматривать поверхность теплообмена с ребром, имеющим радиус 4 мм (рис. 4, а).

Следующая стадия исследований проведена с помощью средств вычислительной гидродинамики в программном комплексе ANSYS Fluent. Опираясь на результаты моделирования, надлежит определить степень турбулизации потока теплоносителя межтрубного пространства теплообменника. Данный параметр нужен для расчета коэффициента теплоотдачи от рассматриваемой поверхности теплообмена (пластины с ребрами) к жидкости, обтекающей эту поверхность.

Для постановки задачи компьютерного моделирования при изучении динамики жидкости в нагреваемом контуре кожухотрубного теплообменника с усовершенствованной поверхностью необходимо задаться допущениями [12–16]:

- протяжённость поверхности теплообмена составляет 1 м;

Таблица 1

**Расчет параметров поверхности теплообмена**

Параметры поверхности теплообмена (при длине трубки 1 м)	Единица измерения	Значение для радиуса ребра, мм		
		6	4	2
Площадь поверхности теплообмена	см <sup>2</sup>	3575	3666	3669
Металлоемкость	мм <sup>3</sup>	3165	2211	1105
Гидравлическое сопротивление	Па	3026	3139	3178



- жидкость в межтрубном пространстве аппарата (обтекающая ребра и пластину) является несжимаемой;
- величина ускорения свободного падения составляет  $9,81 \text{ м/с}^2$  (предполагается движение теплоносителя (жидкости) в системе теплоснабжения);
- отсутствие теплообменных процессов между жидкостью и окружающей средой;
- плотность жидкости одинакова в каждой точке межтрубного пространства теплообменника;
- скорость теплоносителя на входе в межтрубное пространство аппарата принята  $0,1\text{--}1,5 \text{ м/с}$ ;

- величина давления в начале и конце поверхности теплообмена (длиной 1 м) изменяется от  $0,9 \text{ МПа}$  до  $0,898 \text{ МПа}$ ;
- теплоноситель межтрубного пространства имеет температуру  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  (принято среднее значение нагреваемой поверхности при температуре наружного воздуха  $-23 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

#### Результаты исследования

На рис. 5 в виде графических диаграмм представлены значения степени турбулизации во всем потоке теплоносителя. Исследования проведены при разных скоростях теплоносителя, омывающего поверхность теплообмена (ребро и пластину). Таким образом, графические диа-

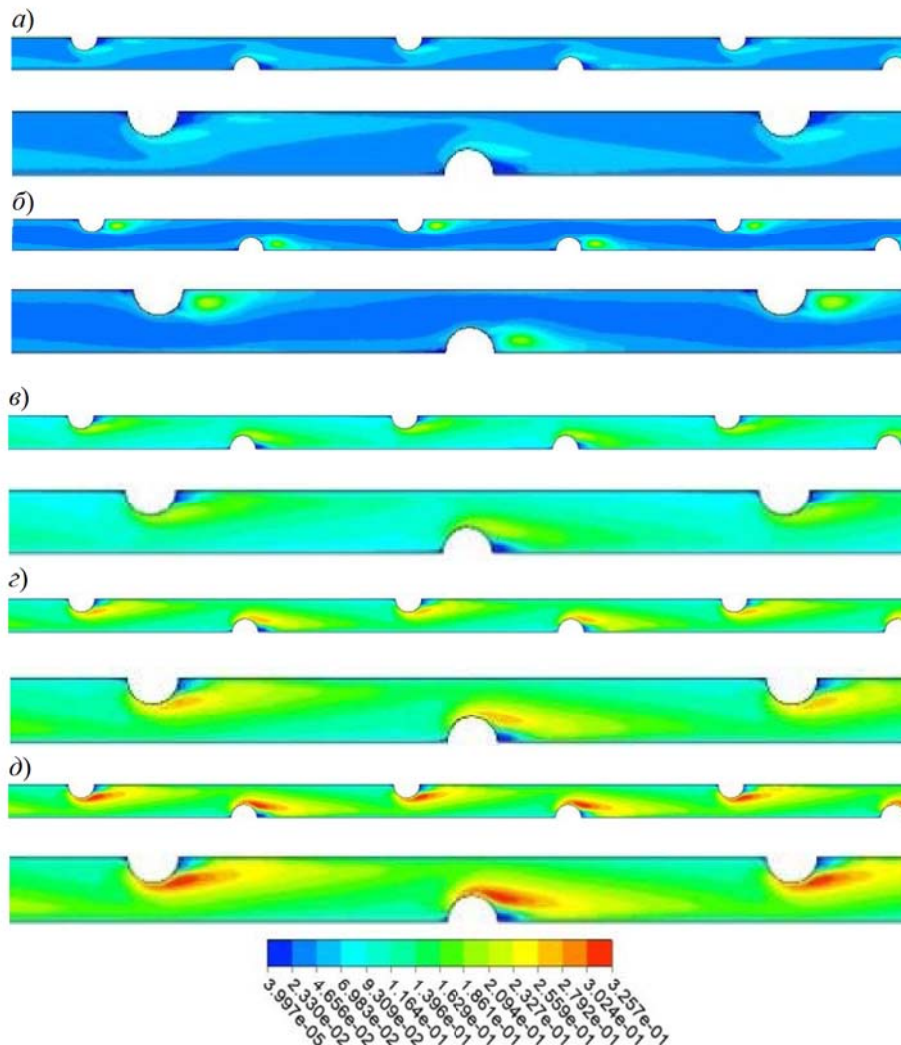


Рис. 5. Диаграммы распределения интенсивности турбулизации с учетом заданных параметров: а — скорость потока теплоносителя  $0,4 \text{ м/с}$ ; б — скорость потока теплоносителя  $0,7 \text{ м/с}$ ; в — скорость потока теплоносителя  $1,0 \text{ м/с}$ ; г — скорость потока теплоносителя  $1,3 \text{ м/с}$ ; д — скорость потока теплоносителя  $1,5 \text{ м/с}$

граммы распределения турбулизации позволяют выявить величину турбулизации в каждой конкретной точке этого потока. При этом учитываются и средняя скорость потока [17, 18].

Анализируя полученные результаты, можно подвести итог: степень турбулизации для рёбер составляет не менее 1,15 %, что, согласно исследованиям М. А. Михеева и А. А. Жукаускаса, приведёт к увеличению коэффициента теплоотдачи от 30 % до 50 %.

Средняя величина степени турбулизации теплоносителя, используемая в дальнейшем для расчётов коэффициента теплоотдачи, представлена в табл. 2.

Для выявления закономерностей изменения степени турбулизации потока теплоносителя требуется выполнить математическую обработку полученных экспериментальных данных (табл. 2), для чего целесообразно применить метод наименьших квадратов.

Таким образом, мы получим закономерности изменения степени турбулизации по линейному закону в зависимости от скорости потока для пластины  $Tu_{п}$  и ребра  $Tu_{р}$ :

$$Tu_{п} = 10,3U_{м.тр} \quad (2)$$

$$Tu_{р} = 12,2U_{м.тр} \quad (3)$$

Одним из значимых результатов компьютерного моделирования динамики потока в кожухотрубном аппарате новой конструкции представляется нахождение геометрических размеров усовершенствованной поверхности теплообмена [19, 20]. Определены радиус ребра цилиндрической формы  $R_0$ , расстояние между ребрами  $l_{\text{н}}$  (см. рис. 1). Конструкция предложенного теплообменника защищена охранным документом — патентом на полезную модель РФ [21].

#### Выводы

Таким образом, исходя из оптимального соотношения габаритных размеров трубок, металлоемкости и гидравлического сопротивления нового элемента поверхности теплообмена для

предложенного теплообменника, определена геометрия поверхности теплообмена — радиус ребра и расстояние между ребрами (турбулизаторами потока). Для определения параметров поверхности применялось компьютерное моделирование, что позволило выявить длину зоны повышенной турбулизации потока, обтекающего ребро, а следовательно, определить расстояние между ребрами. Важным результатом являются новые закономерности изменения степени турбулизации в зависимости от скорости потока для пластины и ребра. Геометрические размеры поверхности теплообмена, а также величину степени турбулизации потока необходимо использовать для расчета коэффициента теплопередачи кожухотрубного аппарата.

*Статья написана в рамках реализации Федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.*

#### Библиографический список

1. Садыкова О. В., Пастухов Н. С. Сравнение пластинчатых и кожухотрубчатых теплообменников // Аллея науки. 2018. № 11. С. 306–312.
2. Guo Z., Shan J., Li J., Levstev A. Numerical Simulation of The Effect of Baffle on Heat Transfer Performance of Shell-and-Tube Heat Exchanger // Bulletin of Science and Practice. 2021. № 7(1). P. 248–253.
3. Патент 149737 Российская Федерация, МПК F28D 7/100/ Кожухотрубный теплообменный аппарат №2014134083/06: заявлен 19.08.14, опубликован 20.01.15 / Никулин Н. Ю., Куцев Л. А., Суслов Д. Ю.; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В. Г. Шухова. Бюл. № 2. 4 с.
4. Круглов Г. А. Теоретические исследования степени взаимосвязи турбулизации потока с коэффициентом теплоотдачи // Вестник КрасГАСУ. 2015. № 6. С. 67–73.
5. Пермяков К. В. Разработка и внедрение кожухотрубных водо-водяных и пароводяных подогревателей повышенной эффективности для систем тепло-

Таблица 2

Средняя величина степени турбулизации потока теплоносителя

Показатели	Режимы работы теплообменника					
Скорость потока, м/с	0,1	0,4	0,7	1	1,3	1,5
Степень турбулизации для пластины, %	1,3	4,4	7,5	10,5	13,4	15,6
Степень турбулизации для ребра, %	1,15	4,7	8,3	12	15,8	18,4



снабжения: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04. М., 2003. 191 с.

6. Куцев Л. А., Никулин Н. Ю., Феоктистов А. Ю., Яковлев Е. А. Интенсификация тепловых процессов в кожухотрубном теплообменном аппарате // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура. 2016. № 3. С. 9–17.

7. Куцев Л. А., Никулин Н. Ю., Феоктистов А. Ю., Алифанова А. И. Современные методы интенсификации теплообмена в кожухотрубных теплообменных аппаратах ЖКХ // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2017. № 9. С. 73–79.

8. Hesselgreaves J. E. Compact Heat Exchangers // Edinburgh: Butterworth-Heinemann, 2016. 502 p.

9. Александрова А. А. Оптимальные по технико-экономическим критериям конструкции кожухотрубных теплообменников, полученные с помощью графического метода // Успехи в химии и химической технологии. 2007. № 2. Т. 21. С. 62–66.

10. Кунтыш В. Б. Тепловая эффективность вихревой интенсификации теплоотдачи газового потока при продольном и поперечном обтекании круглотрубных поверхностей // Известия высших учебных заведений СНГ. 2014. № 2. С. 68–75.

11. Каменский М. Н. Особенности проектирования кожухотрубного теплообменного аппарата // Известия Тульского государственного университета. 2014. № 2. С. 40–43.

12. Юн А. А. Расчет и моделирование турбулентных течений с теплообменом, смешением, химическими реакциями и двухфазных течений. М.: Изд-во МАИ, 2007. 116 с.

13. Гарбарук А. В., Стрелец М. Х., Травин А. К. Современные подходы к моделированию турбулентности. СПб.: Издательство Политехнического университета, 2016. 234 с.

14. Федорова Н. Н., Вальгер С. А., Данилов М. Н. Основы работы в ANSYS 17. М.: ДНК Пресс, 2017. 210 с.

15. Никулин Н. Ю., Куцев Л. А., Феоктистов А. Ю. Исследование кожухотрубного теплообменного аппарата методом вычислительной гидродинамики // Актуальные проблемы строительства: материалы 70-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства». 2017. Ч. 3. С. 52–57.

16. Santiesteban-Cos R. Reliable compartmental models for double-pipe heat exchangers // Applied Mathematical Modelling. 2007. № 31. Pp. 1739–1752.

17. Жаров А. В., Павлов А. А., Фавстов В. С., Горшков Р. В. Исследование процессов в теплообменнике-утилизаторе теплоты отработанных газов дизельной когенерационной установки транспортного средства

методами компьютерной гидрогазодинамики // Фундаментальные исследования. 2013. № 10. С. 21–27.

18. Daehae Kim, Pialago E. J., Shin Jai-Yoon, Kwon O., Kim Min Soo, Park C. Performance characteristics of heat exchanger with internal turbulence generators under various blade configurations and operating conditions // Applied Thermal Engineering. 2017. № 123. P. 562–572.

19. Алхасова Д. А. Исследование и гидродинамические расчеты внутрискважинных теплообменников с продольными ребрами: дисс. ... канд. техн. наук: 01.04.14. Махачкала, 2009. 143 с.

20. Каменский М. Н., Каменский М. Н., Козлов А. М. Особенности проектирования кожухотрубного теплообменного аппарата // Известия Тульского государственного университета. 2014. № 2. С. 40–43.

21. Патент № 185391 Российская Федерация, МПК F28D 7/00 (2006.01), F28F 1/38 (2006.01). Кожухотрубный теплообменный аппарат: № 2018123055: заявлен 25.06.2018; опубликован 04.12.2018 / Куцев Л. А., Никулин Н. Ю., Шаптала В. Г. Бюл. № 34. 4 с.

## References

1. Sadykova O. V. Pastukhov N. S. *Sravnienie plastinchatykh i kozhukhotrubchatykh teploobmennikov* [Comparison of plate and shell-and-tube heat exchangers]. *Alleya nauki – Alley of Science*, 2018, no. 11, pp. 306–312.

2. Guo Z. Shan J., Li J., Levtshev A. Numerical simulation of the effect of baffle on heat transfer performance of shell-and-tube heat exchanger. *Bulletin of Science and Practice*, 2021, no. 7 (1), pp. 248–253.

3. Nikulin N. Yu., Kushchev L. A., Suslov D. Yu. *Kozhukhotrubniy teploobmenniy apparat no. 2014134083/06* [Shell-and-tube heat exchanger no. 2014134083/06]. Patent RF, no. 2014134083/06, 2015.

4. Kruglov G. A. *Teoreticheskie issledovaniya stepeni vzaimosvyazi turbulizatsii potoka s koeffitsientom teplootdachi* [Theoretical studies of the degree of correlation between flow turbulence and heat transfer coefficient]. *Vestnik KrasGASU – Bulletin of KrasGASU*, 2015, no. 6, pp. 67–73.

5. Permyakov K. V. *Razrabotka i vnedrenie kozhukhotrubnykh vodo-vodyanykh i parovodyanykh podogrevateley povyshennoy effektivnosti dlya sistem teplosnabzheniya*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development and implementation of shell-and-tube water-water and steam-water heaters of increased efficiency for heat supply systems. PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2003, 191 p.

6. Kushchev L. A., Nikulin N. Yu., Feoktistov A. Yu., Yakovlev E. A. *Intensifikatsiya teplovykh protsessov v kozhukhotrubnom teploobmennom apparate* [Intensification of heat processes in shell-and-tube heat exchange apparatuses]. *Nauchniy vestnik Voronezhskogo GASU. Stroitel'stvo i arkhitektura – Scientific Bulletin*

of Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. *Construction and Architecture*, 2016, no. 3, pp. 9–17.

7. Kushchev L. A., Nikulin N. Yu., Feoktistov A. Yu., Alifanova A. I. *Sovremennye metody intensivatsii teploobmena v kozhukhotrubnykh teploobmennyykh apparatakh ZhKKh* [Modern methods of heat exchange intensification in shell-and-tube heat exchangers of housing and communal services]. *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova – Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov*, 2017, no. 9, pp. 73–79.

8. Hesselgreaves J. E. *Compact Heat Exchangers*. Edinburgh, Butterworth-Heinemann Publ., 2016, 502 p.

9. Aleksandrova A. A. *Optimal'nye po tekhniko-ekonomicheskim kriteriyam konstruksii kozhukhotrubnykh teploobmennikov, poluchennye s pomoshch'yu graficheskogo metoda* [Optimal according to technical and economic criteria designs of shell-and-tube heat exchangers obtained by means of graphic method]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii – Advances in chemistry and chemical technology*, 2007, no. 2, vol. 21, pp. 62–66.

10. Kuntyshev V. B. *Teplovaya effektivnost' vikhrevoy intensivatsii teplootdachi gazovogo potoka pri prodol'nom i poperechnom obtekanii kruglotrubnykh poverkhnostey* [Thermal efficiency of vortex intensification of heat transfer of a gas stream at a longitudinal and transverse flow around round-tube surfaces]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy SNG – Proceedings of higher educational institutions of the CIS*, 2014, no. 2, pp. 68–75.

11. Kamenskiy M. N. *Osobennosti proektirovaniya kozhukhotrubnogo teploobmennogo apparata* [Features of the design of shell-and-tube heat exchange apparatus]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta – Proceedings of Tula State University*, 2014, no. 2, pp. 40–43.

12. Yun A. A. *Raschet i modelirovanie turbulentnykh techeniy s teploobmenom, smesheniem, khimicheskimi reaktsiyami i dvukhfaznykh techeniy* [Calculation and modeling of turbulent flows with heat exchange, mixing, chemical reactions and two-phase flows]. Moscow, MAI Publ., 2007, 116 p.

13. Garbaruk A. V., Strelets M. Kh., Travin A. K. *Sovremennye podkhody k modelirovaniyu turbulentnosti* [Modern approaches to turbulence modeling]. St. Petersburg, Izdatel'stvo Politekhnikheskogo universiteta Publ., 2016, 234 p.

14. Fedorova N. N., Val'ger S. A., Danilov M. N. *Osnovy raboty v ANSYS 17* [Fundamentals of work in ANSYS 17]. Moscow, DNK Press Publ., 2017, 210 p.

15. Nikulin N. Yu., Kushchev L. A., Feoktistov A. Yu. *Issledovanie kozhukhotrubnogo teploobmennogo apparata metodom vychislitel'noy gidrodinamiki* [Investigation of shell-and-tube heat-exchange apparatus by computational hydrodynamics method]. *Aktual'nye problemy stroitel'stva: materialy 70-y Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh «Aktual'nye problemy sovremennogo stroitel'stva»* [Proceedings of the 70-th All-Russian scientifically-practical conference of students, post-graduate students and young scientists “Actual problems of modern building”]. 2017, Pt. 3, pp. 52–57.

16. Santiesteban-Cos R. *Reliable compartmental models for double-pipe heat exchangers*. *Applied Mathematical Modeling*, 2007, no. 31, pp. 1739–1752.

17. Zharov A. V., Pavlov A. A., Favstov V. S., Gorshkov R. V. *Issledovanie protsessov v teploobmennike-utilizatore teploty otrabotannykh gazov dizel'noy kogeneratsionnoy ustanovki transportnogo sredstva metodami komp'yuternoy gidrogazodinamiki* [Study of processes in the heat exchanger-exchanger of exhaust heat of diesel cogeneration unit of a vehicle by methods of computer hydrogasodynamics]. *Fundamental'nye issledovaniya – Fundamental Research*, 2013, no. 10, pp. 21–27.

18. Daehae Kim, Pialago E. J., Shin Jai-Yoon, Kwon O., Kim Min Soo, Park C. *Performance characteristics of heat exchanger with internal turbulence generators under various blade configurations and operating conditions*. *Applied Thermal Engineering*, 2017, no. 123, pp. 562–572.

19. Alkhasova D. A. *Issledovanie i gidrodinamicheskie raschety vnutriskvazhinnykh teploobmennikov s prodol'nymi rebrami*. *Diss. kand. tekhn. nauk* [Research and hydrodynamic calculations of downhole heat exchangers with longitudinal ribs. PhD in Sci. Tech. diss.]. Makhachkala, 2009, 143 p.

20. Kamenskiy M. N., Kamenskiy M. N., Kozlov A. M. *Osobennosti proektirovaniya kozhukhotrubnogo teploobmennogo apparata* [Features of design of shell-and-tube heat exchange apparatus]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta – Proceedings of Tula State University*, 2014, no. 2, pp. 40–43.

21. Kushchev L. A., Nikulin N. Yu., Shaptala V. G. *Kozhukhotrubniy teploobmenniy apparat no. 2018123055* [Leather-tube heat exchanger apparatus no. 2018123055]. Patent RF, no. 185391, 2018.