

УДК 66.045.1

**ВЕРИФИКАЦИЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ
КОЖУХОТРУБЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА**

**VERIFICATION OF THE FINITE ELEMENT MODEL
OF SHELL-AND-TUBE HEAT EXCHANGER**

Четверткова О.В., Ризванов Р.Г., Миронов А.В., Шарафиев Р.Г.

**ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический
университет», г. Уфа, Российская Федерация**

O.V. Chetvertkova, R.G. Rizvanov, A.V. Mironov, R.G. Sharafiev

**FSBEI NPE “Ufa State Petroleum Technological University”,
Ufa, the Russian Federation**

e-mail: Tna_ugntu@mail.ru

Аннотация. Теплопередача в кожухотрубчатом, теплообменном аппарате – сложный процесс, зависящий от множества факторов: свойств теплоносителей, геометрических параметров проточной области, качества теплопередающей поверхности.

Выбор оптимального соотношения геометрических параметров для достижения наибольшей энергетической эффективности теплообменного аппарата должен производиться на основании исследования тепло-гидравлических характеристик потоков.

Наиболее эффективным методом исследования процессов гидродинамики и теплопередачи в настоящее время является метод вычислительной гидродинамики, реализованный в программных системах конечно-элементного анализа. Преимуществами вычислительной гидродинамики является высокая скорость расчета, точность и полнота полученных данных, дающая представление о распределении и скорости

потоков в аппарате, гидравлическом сопротивлении внутреннего пространства в целом и его отдельных участков.

В статье описана конечно-элементная модель теплообменного аппарата. Модель теплообменного аппарата состоит из трех расчетных областей (трубное пространство, металл труб, межтрубное пространство) и включает взаимодействие между расчетными областями.

Результаты численного моделирования дают полную картину распределения тепло-гидравлических параметров потоков в межтрубном и трубном пространстве. Особый интерес представляет течение в межтрубном пространстве, обладающим более сложной конфигурацией. Моделирование позволило оценить распределение потока теплоносителя, определить качественные и количественные характеристики влияния конструктивных зазоров и размещения перегородок.

Для оценки точности полученных результатов, соответствия расчетной модели реальному теплообменному аппарату, проведена верификация результатов – сравнение с результатами натурного эксперимента. Для этих целей создана экспериментальная установка, позволяющая отслеживать и записывать температуру потоков на входе и выходе из аппарата, измерять давление и расход жидкости на входе в аппарат.

Сравнение результатов численного моделирования и эксперимента показало хорошую сходимость результатов и подтвердило адекватность разработанной конечно-элементной модели.

Abstract. Heat transfer in shell-and-tube heat exchangers is a complex process depending on many factors: the fluid properties, the geometric parameters of the flow region, the quality of the heat transfer surface caused by physical properties, surface roughness and fouling rate

Selection of the optimum ratio of geometrical parameters in order to achieve maximum energy efficiency of the heat exchanger must be based on the study of thermal and hydraulic characteristics of the flow.

The most effective method for studying hydrodynamic and heat transfer processes is now the method of computational fluid dynamics implemented in finite element analysis systems. Advantages of CFD is the high speed of calculation, the accuracy and completeness of the result data, which gives an understanding of distribution and flow rates in the apparatus, pressure drop of the interior space as a whole and its individual regions.

The article describes a finite element model of the heat exchanger. Model consists of three domains (tube side, metal pipe, shell side) and the domain interfaces.

The simulation results give a complete picture of the distribution of thermal and hydraulic parameters. Of particular interest is the flow in the shell-side that has a more complex configuration. Simulation allowed us to estimate the distribution of the fluid flow, to determine the qualitative and quantitative characteristics of the influence of gaps and baffle spacing.

To assess the accuracy of the results and compliance with the model and the real heat exchanger was carried out verification of the results - a comparison with the results of a natural experiment. For this purpose, the experimental setup was made, which can be used to monitor and record the temperature of the flow at the inlet and outlet to measure pressure and flow rate at the inlet of the heat exchanger.

Comparison of numerical simulation and experimental results showed good agreement and confirmed compliance of developed finite element model and the real heat exchanger.

Ключевые слова: кожухотрубчатый теплообменный аппарат, эксперимент, верификация, CFD, конечно-элементное моделирование.

Key words: shell-and-tube heat exchanger, experiment, verification, CFD, finite element simulation.

Кожухотрубчатые теплообменные аппараты широко применяются на предприятиях нефтепереработки, нефтехимии, пищевого производства и в других отраслях промышленности. Это обусловлено надежностью конструкции и разнообразием типов и вариантов исполнения для различных условий эксплуатации.

Тепловая производительность кожухотрубчатых теплообменных аппаратов - сложный многофакторный показатель. Для исследования совместного влияния на теплопередачу конструктивных параметров, таких как радиальные зазоры в конструкции и размещение поперечных перегородок, качества теплопередающей поверхности, используются различные экспериментальные и аналитические методы. Наиболее эффективным методом исследования процессов гидродинамики и теплообмена в настоящее время является метод вычислительной гидродинамики, реализованный в программных системах конечно-элементного анализа. Преимуществами вычислительной гидродинамики является высокая скорость расчета, точность и полнота полученных данных, дающая представление о распределении и скорости потоков в аппарате, гидравлическом сопротивлении внутреннего пространства в целом и его отдельных участков [1, 2].

Ранее была разработана конечно-элементная модель теплообменного аппарата диаметром 400 мм, для исследования влияния на теплопередачу конструктивных зазоров ΔR – между перегородкой и кожухом и Δr – между трубками и отверстиями в перегородке. Расчетная модель не учитывает теплоотдачу потока со стороны трубного пространства и сопротивление теплообменных труб: вместо условия сопряжения задавалась постоянная температура теплообменной поверхности.

На основе разработанной модели проведено исследование зависимости следующих характеристик от размеров зазоров ΔR и Δr :

- долей байпасных потоков, проходящих через зазоры;
- гидравлического сопротивления межтрубного пространства;

- коэффициента теплоотдачи со стороны межтрубного пространства [3, 4].

Однако данная модель нуждается в подтверждении полученных результатов.

Ввиду больших размеров и сложности изготовления экспериментальной установки на основе теплообменного аппарата диаметром 400 мм проведена верификация конечно-элементной модели меньших размеров, аналогичной выше описанной. Модель теплообменного аппарата описывает три расчетные области: трубное пространство, металл труб, межтрубное пространство и взаимодействие между расчетными областями [5].

Конечно-элементная модель теплообменного аппарата разработана с использованием программы ANSYS CFX. Геометрическая модель аппарата построена в программе АСКОН КОМПАС v13.1 и импортирована для построения сетки конечных элементов в среду ANSYS ICEM CFD v12.1. Сетка конечных элементов (рисунок 1) состоит из гексаэдров, средний размер элементов 2 мм, толщина слоя элементов около поверхностей теплообменных трубок 0,2 мм.

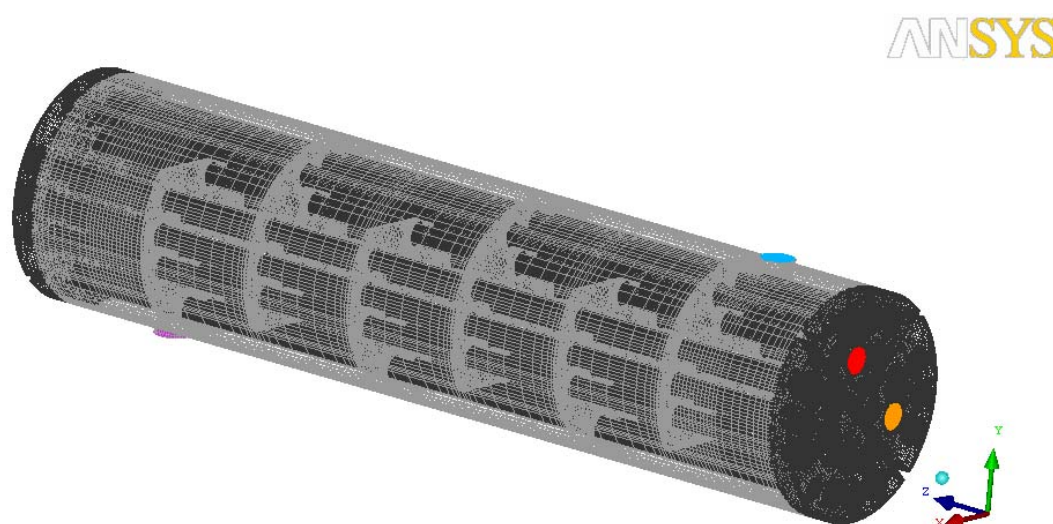


Рисунок 1. Сетка конечных элементов

Элементы сетки разделены на три части по принадлежности к расчетным областям:

- межтрубное пространство (SHELLSIDE – 625912 элемента);
- теплообменные трубки (TUBES – 229632 элемента);
- трубное пространство (TUBESIDE – 476272 элемента).

Готовая сетка конечных элементов экспортирована в среду ANSYS Workbench v12.1 для выполнения расчета методом вычислительной гидродинамики (computational fluid dynamic - CFD). Расчетная модель состоит из трех областей: межтрубное пространство, трубки, трубное пространство.

Межтрубное пространство:

Тип расчетной области – Fluid, материал – вода.

Граничные условия определяются следующими значениями переменных:

Вход – массовый расход и температура потока.

Выход – давление.

Стенка – адиабатическая на поверхностях перегородок и торцевых границ расчетной области.

Стенка – с заданной температурой наружной стенки кожуха и коэффициентом теплоотдачи $10 \text{ кВт/м}^2 \cdot \text{К}$ на цилиндрической поверхности кожуха.

Трубное пространство:

Тип расчетной области – Fluid, материал – вода.

Граничные условия:

Вход – массовый расход и температура потока.

Выход – давление.

Стенка – адиабатическая на поверхностях перегородок и торцевых границ расчетной области.

Трубки:

Тип расчетной области – Solid, материал – сталь.

Граничные условия:

Стенка – адиабатическая на торцевых поверхностях расчетной области.

Передача тепловой энергии между расчетными областями задана по цилиндрическим поверхностям трубок. В расчете заданы два условия взаимодействия: «Межтрубное пространство – Трубки» и «Трубное пространство – Трубки», подразумевающих передачу теплового потока с сопротивлением $2 \times 10^{-5} \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$, соответствующим загрязнению (ржавчина) на поверхности труб.

Начальные условия заданы одинаковыми для всех областей расчетной модели и соответствуют условиям в помещении, где проводился эксперимент: температура $27 \text{ }^\circ\text{C}$, давление $0,1 \text{ МПа}$.

Описанная конечно-элементная модель и результаты расчетов, нуждаются в верификации. Для подтверждения точности результатов путем сопоставления их с опытными данными на базе лаборатории кафедры «Технология нефтяного аппаратостроения» создана лабораторная установка для исследования процессов теплопередачи в кожухотрубчатом теплообменном аппарате (рисунок 2). Установка состоит из теплообменного аппарата, технологических трубопроводов и приборов КИП. Подвод и отвод воды осуществляется с применением существующих коммунальных сетей. Схема установки показана на рисунке 3.

Принцип работы лабораторной установки следующий: вода поступает из водопровода через счетчик 3, кран 1 и выводится из аппарата через кран 6 в канализацию. Направление подачи горячей и холодной воды в трубное или межтрубное пространство устанавливается подключением технологических трубопроводов перед началом эксперимента. Показания датчиков температуры 4 передаются на экранный регистратор 2.

Установка позволяет отслеживать и записывать температуру потоков на входе и выходе из аппарата, измерять давление и расход жидкости на входе в аппарат.

Лабораторная установка построена на основе кожухотрубчатого теплообменного аппарата с плавающей головкой внутренним диаметром

147 мм, длиной 726 мм. Основные геометрические параметры теплообменного аппарата приведены в таблице 1.



Рисунок 2. Вид экспериментальной установки

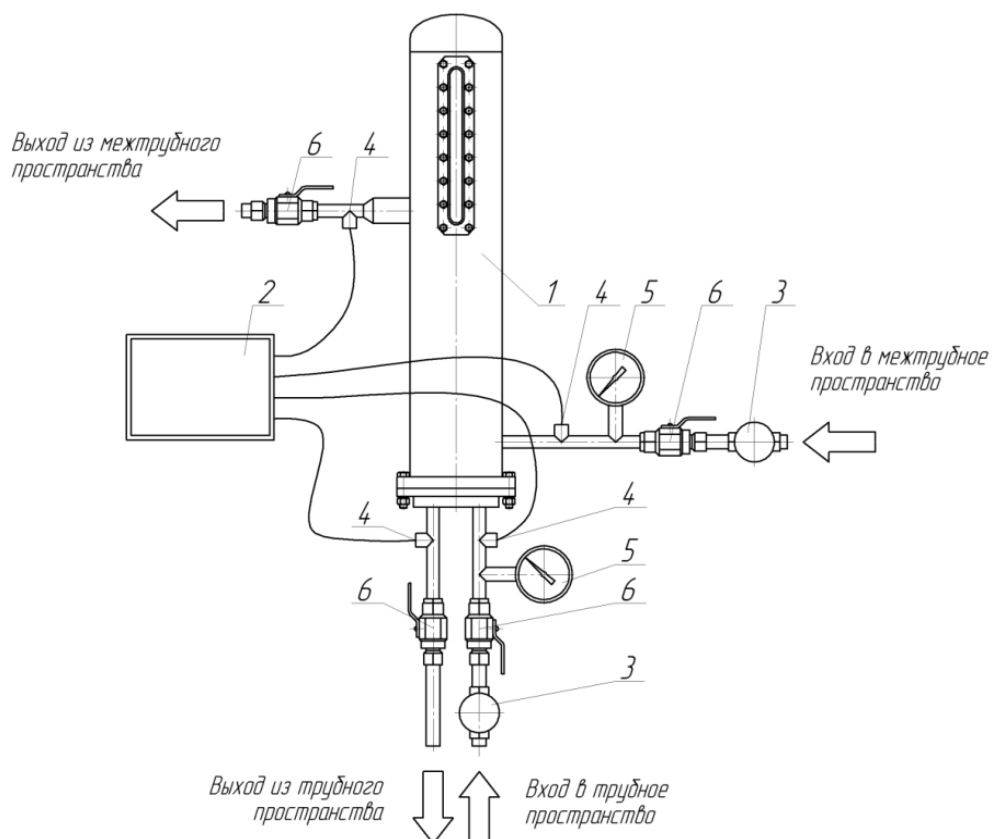


Рисунок 3. Схема лабораторной установки

1 – теплообменный аппарат; 2 – экранный регистратор Logoscreen – cf;
3 – счетчики воды СКВУ 20; 4 – датчики температуры;
5 – манометры; 6 – краны

Таблица 1. Геометрические параметры теплообменного аппарата

Внутренний диаметр кожуха	147 мм
Толщина стенки кожуха	6 мм
Наружный диаметр труб	16,5 мм
Толщина стенки труб	2,0 мм
Длина труб	578 мм
Количество труб	20
Количество ходов по трубному пространству	4
Расстояние между поперечными перегородками	71 мм
Высота выреза перегородки	31,6 мм
Количество перегородок	6
Площадь поверхности теплопередачи	0,56 м ²
Радиальный зазор между перегородкой и внутренней поверхностью кожуха	0,8 мм
Радиальный зазор между трубками и отверстиями в перегородке	0,4 мм

На описанной установке проведены две серии экспериментов: в первом случае горячий поток направлялся в межтрубное пространство, холодный – в трубное пространство; во втором случае горячий поток направлялся в трубное пространство, холодный – в межтрубное пространство. Технологические характеристики потоков приведены в таблице 2.

Таблица 2. Характеристики потоков жидкости на входе в аппарат

№ эксп.	Характеристика	Трубное пространство	Межтрубное пространство	
1	Объемный расход жидкости на входе, м ³ /с	0,275×10 ⁻³	0,216×10 ⁻³	
	Давление, МПа	0,11	0,1	
	Температура, °С	на входе	51,2	11,7
		на выходе	40,9	19,2
2	Объемный расход жидкости на входе, м ³ /с	0,209×10 ⁻³	0,269×10 ⁻³	
	Давление, МПа	0,08	0,15	
	Температура, °С	на входе	9,5	49,7
		на выходе	19,3	36,9

В расчетной модели значения переменных: температуры, давления, расхода потоков на входе в расчетную область, приняты в соответствии с экспериментальными значениями, приведенными в таблице 2. Расчетная модель показана на рисунке 4.

Средние значения температуры на выходных сечениях, определенные в условиях эксперимента и расчета, приведены в таблице 3.

Таблица 3. Средние значения температуры на выходных сечениях

№ эксперимента	Положение	Температура потока, °С		Отклонение	
		Эксперимент	Численное моделирование	абс. °С	%
1	Трубное пространство	40,9	41,4	0,5	1,22
	Межтрубное пространство	19,2	19,2	0	0
2	Трубное пространство	36,9	36,7	0,2	0,54
	Межтрубное пространство	19,3	19,2	0,1	0,52

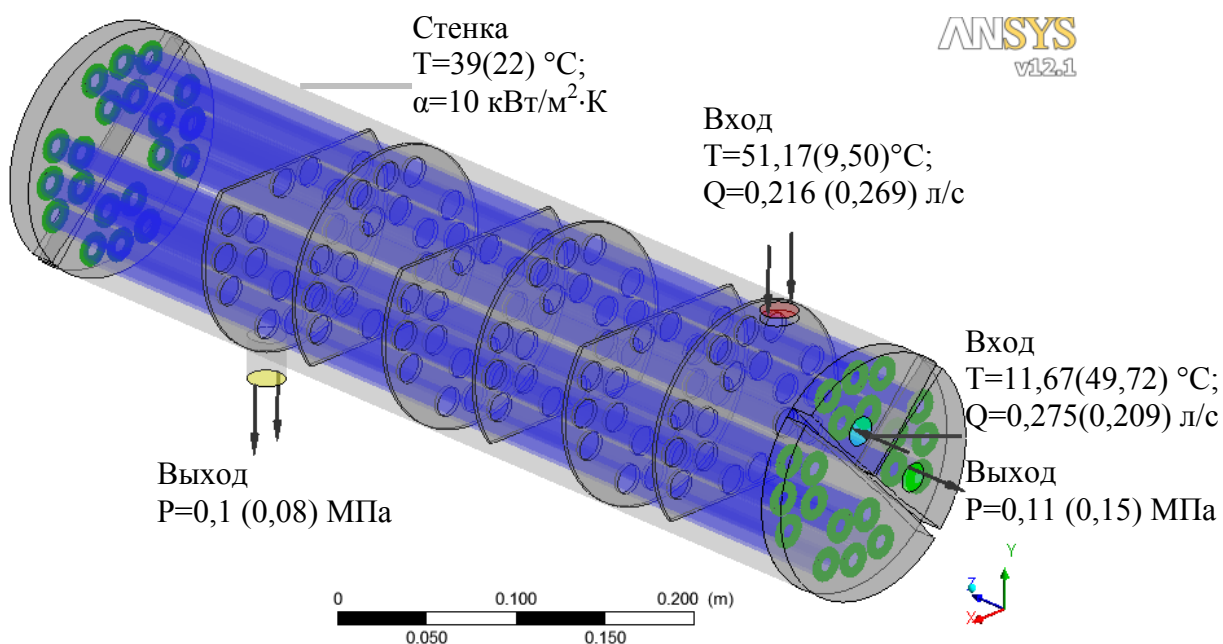


Рисунок 4. Расчетная модель

На рисунках 5,6 показаны поля температуры в продольных сечениях межтрубного и трубного пространства теплообменного аппарата, соответственно.

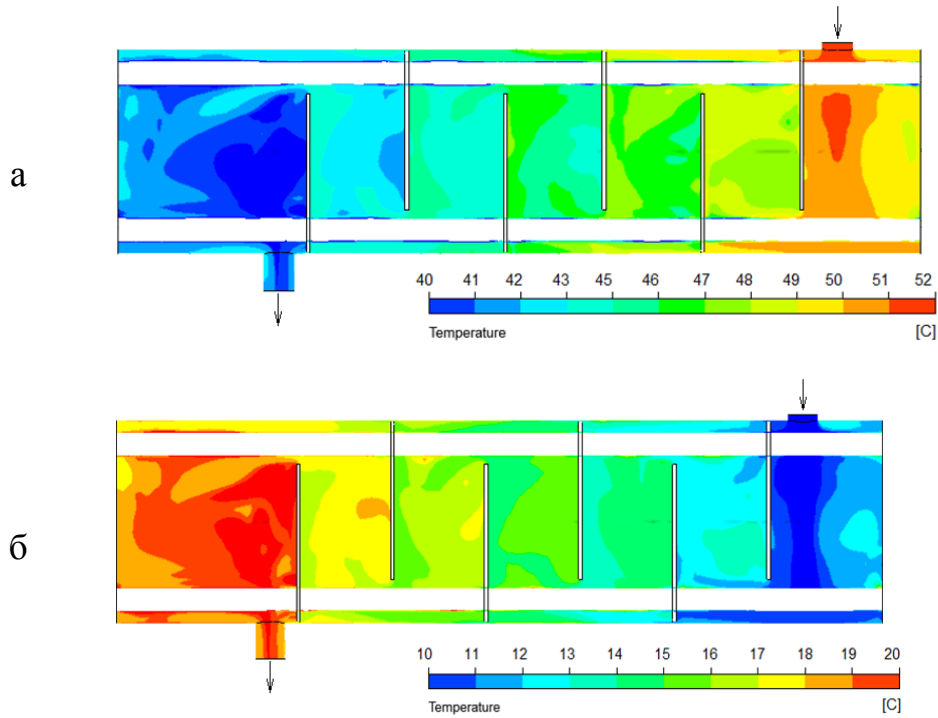


Рисунок 5. Распределение температуры в продольном сечении межтрубного пространства: а – эксперимент № 1; б – эксперимент № 2

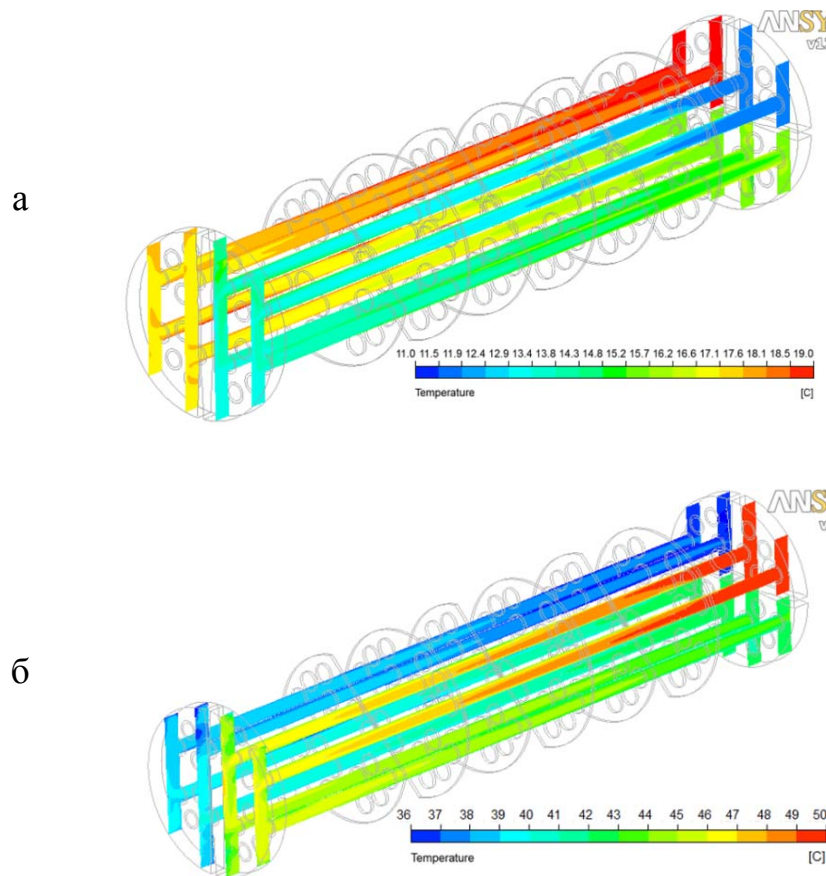


Рисунок 6. Распределение температуры в продольных сечениях трубного пространства: а – эксперимент № 1; б – эксперимент № 2

Выводы

Сравнение результатов натурного численного моделирования и эксперимента показывает их хорошую сходимость и подтверждает адекватность численного моделирования с использованием описанной выше расчетной модели.

Полученная конечно-элементная модель позволяет проводить многофакторное исследование теплопередачи в кожухотрубчатом теплообменном аппарате с учетом радиальных зазоров, конструкции и размещения поперечных перегородок.

Список используемых источников

1 Аметистов Е.В., Григорьев В.А., Емцов Б.Т. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: справочник / под общей ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. М.: Энергоиздат, 1982. 512 с., ил.

2 Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982. 472 с.

3 Четверткова О.В., Ризванов Р.Г. Влияние конструктивных зазоров на интенсивность теплообмена и гидравлическое сопротивление кожухотрубчатого теплообменного аппарата // Нефтегазовое дело. 2012. Т. 10. № 3. С. 109-112.

4 Четверткова О.В., Ардаширова Э.А. Зависимость эффективности кожухотрубчатых теплообменных аппаратов от величины зазоров в межтрубном пространстве // 66 Междунар. молодежная науч. конф. «Нефть и газ 2012». М.: РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина, 2012. С. 72.

5 Моделирование сопряженного теплообмена в трубчатом теплообменнике // «ANSYS Advantage. Русская редакция» инженерно-технический журнал. 2008. № 7. С. 2-8.

References

- 1 Ametistov E.V., Grigoryev V.A., Emcov B.T. Teplo- i massoobmen. Teplotehnicheskijj eksperiment: Spravochnik / pod obshej red.V.A. Grigoryeva i V.M. Zorina. M.: Energoizdat, 1982. 512 s., il. [in Russian].
- 2 Zhukauskas A.A. Konvektivnyjperenos v teploobmennikah. M.: Nauka, 1982. 472 s. [in Russian].
- 3 Chetvertkova O.V., Rizvanov R.G. Influence of constructive gaps on heat transfer rate and hydraulic resistance of shell-and-tube heat exchanger // Oil and Gas Business. 2012. T. 10. № 3. S. 109-112. [in Russian].
- 4 Chetvertkova O.V., Ardashirova E.A. The dependence of the efficiency of shell and tube heat exchangers on the gap in the shell-side // 66 International Youth Conference "Oil and Gas 2012". M. : Russian State University of Oil and Gas. Gubkin, 2012. s. 72. [in Russian].
- 5 Simulation of conjugate heat transfer in a tubular heat exchanger // «ANSYSAdvantage. Russian edition» engineering magazine. 2008. № 7. S. 2-8. [in Russian].

Сведения об авторах

About the authors

Четверткова О.В., аспирант кафедры «Технология нефтяного аппаратостроения», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

O.V. Chetvertkova, Post-graduate Student of the Chair “Petroleum Apparatus Building Technology”, FSBEI NPE USPTU, Ufa, the Russian Federation

Миронов А.В., аспирант кафедры «Технология нефтяного аппаратостроения», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

A.V. Mironov, Post-graduate Student of the Chair “Petroleum Apparatus Building Technology”, FSBEI NPE USPTU, Ufa, the Russian Federation

Ризванов Р.Г., д-р техн. наук, профессор кафедры «Технология нефтяного аппаратостроения», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

R.G. Rizvanov, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Chair “Petroleum Apparatus Building Technology”, FSBEI NPE USPTU, Ufa, the Russian Federation

Шарафиев Р.Г., д-р техн. наук, профессор кафедры «Технология нефтяного аппаратостроения», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

R.G. Sharafiev, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Chair “Petroleum Apparatus Building Technology”, FSBEI NPE USPTU, Ufa, the Russian Federation

e-mail: Tna_ugntu@mail.ru