



УДК 66.045.1

DOI: 10.17673/Vestnik.2020.04.21

**А. С. ГОРШЕНИН
Н. П. КРАСНОВА
Ю. И. РАХИМОВА**

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЖУХОТРУБЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА В ПРОГРАММНОМ ПРОДУКТЕ ANSYSFLUENT

NUMERICAL SIMULATION OF SHELL
AND TUBE HEAT EXCHANGER IN ANSYSFLUENT SOFTWARE

Рассматривается численное моделирование водо-водяного кожухотрубчатого теплообменника с использованием возможностей математического моделирования средствами пакета конечно-элементного анализа. Предложен алгоритм решения задач тепло- и массообмена в программном продукте ANSYSFluent. Отличительной особенностью данного алгоритма является простота и точность производимых расчётов. В ходе исследования получены контуры распределения скорости и температуры в теплообменном аппарате, а также произведена верификация данных, полученных при помощи компьютерного моделирования, с аналитическим решением.

Ключевые слова: кожухотрубчатый теплообменник, теплообменный аппарат, численное моделирование, контур температуры, контур скорости, ANSYSFluent

Numerical modeling of a water-to-water shell-and-tube heat exchanger using the capabilities of mathematical modeling by means of a finite element analysis package is considered. An algorithm for solving problems of heat and mass transfer in the ANSYSFluent software product is proposed. A distinctive feature of this algorithm is the simplicity and accuracy of the calculations. In the course of the study, the contours of the velocity and temperature distribution in the heat exchanger were obtained, and the data obtained using computer modeling were verified with an analytical solution.

Keywords: shell and tube heat exchanger, heat exchanger, numerical simulation, temperature loop, velocity loop, ANSYSFluent

Для производства тепловой энергии требуется применение современного оборудования: в котельных, тепловых сетях, тепловых пунктах, различных системах теплоснабжения в промышленности. В настоящее время при распределении тепловой энергии для подготовки горячей воды в тепловых сетях применяются кожухотрубчатые теплообменные аппараты. Такая конструкция теплообменного аппарата хорошо зарекомендовала себя при длительной эксплуатации [1].

Основной тенденцией производства в настоящее время является увеличение эффективности используемого технологического оборудования [2]. Кожухотрубчатый теплообменный аппарат (КТА) – один из широко распространённых теплообменников не только в энергетике, но и в нефтяной, химической промышленности и др. [3]. Распространение кожухотрубчатого теплообменного аппарата обусловлено надёжностью конструкции и раз-

нообразием типов и вариантов исполнения для эксплуатации в широком диапазоне температуры, давления и коррозионной активности среды.

Исследования КТА ведутся во многих областях: застойные зоны в межтрубном пространстве из-за перегородок [4] со спиральными и полукольцевыми выемками [5], гидрогазодинамика КТА [6], численные модели КТА и проблемы их верификации и валидации [7].

В связи с тем, что испытание новых конструкций с помощью эмпирических методов достаточно дорогостояще и трудоемко, применяются новые методы для определения характеристик теплообменников. Одним из современных методов является компьютерное моделирование, которое позволяет испытывать новые конструкции теплообменников с помощью CFD расчетов [8]. Наиболее эффективным методом исследования процессов гидродинамики и теплопередачи в настоящее время является метод вычислительной гидродинамики, реализованный в программных системах конечно-элементного анализа. Преимуществом 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.

Цель данной работы – создание компьютерной модели процесса теплообмена и массообмена в пространстве водо-водяного кожухотрубчатого теплообменника для дальнейшего исследования различных конструкций теплообменника при помощи компьютерного моделирования и валидации данной модели при помощи аналитического решения.

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

Описание модели. Оборудование абонентских установок состоит из различного рода теплообменных аппаратов, нагревательных приборов, водо-водяных подогревателей, калориферов и т. п. [9].

Расчет регулирования современных систем централизованного теплоснабжения проводится по уравнениям, описывающим работу различного типа теплообменных аппаратов в нерасчетных условиях. В таких условиях обычно известны только температуры теплоносителей на входе в теплоиспользующие установки и, как правило, не известны температуры теплоносителей на выходе из них.

Для сравнения аналитического и численного решения были заданы следующие условия: температура греющего теплоносителя на входе $63\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура нагреваемого теплоносителя на входе $12\text{ }^{\circ}\text{C}$, а также скорость на входе в подающие патрубки 1 м/с как для аналитического, так и для численного решения. Известны габаритные размеры теплообменника: количество и размер трубок, количество ходов, размеры кожуха. По данным параметрам была построена трёхмерная модель подогревателя. Ожидаемые температуры на выходе были вычислены аналитически и сравнены с температурами по результату моделирования. Также по исходным данным была аналитически пересчитана площадь теплообмена.

В рамках исследуемой задачи выбран водо-водяной кожухотрубчатый четырёхходовой противоточный теплообменник с подачей горячей воды в межтрубное пространство. Некоторые из конструктивных и заданных геометрических параметров представлены ниже:

- размер корпуса (кожуха) $D_c - 2\text{ м}$;
- внутренний диаметр трубы $d_o - 0,1\text{ м}$;
- количество труб $H_m - 12$;
- длина теплообменника $l - 5\text{ м}$;
- температура на входе в корпус $T - 285\text{ К}$;
- толщина стенки труб $\delta - 0,5\text{ мм}$;
- входные и выходные патрубки греющего и нагреваемого теплоносителя – $0,5\text{ м}$.

На начальном этапе построена геометрия модели кожухотрубчатого теплообменника во встроенном в ANSYS модуле – DesignModeler, которая состоит из двух тел: пространство нагреваемого теплоносителя (coldwater), греющего теплоносителя (hotwater) (рис.1).

Для выполнения численного эксперимента произведена генерация и адаптация расчётной сетки в модуле ANSYS Meshing. Структура расчётной сетки показана на рис. 2. Общее число элементов сетки: 6265630.

Устанавливались настройки решателя Fluent во встроенном модуле Set Up. Задача решалась в стационарном виде Steady, тип решателя на основе давления Pressure-Based. Подключена гравитация по оси $Y(-9,81\text{ м/с}^2)$, подключено уравнение энергии, для описания движения жидкости в теплообменнике используется k-epsilon модель турбулентности со стандартной пристеночной функцией. Задавались граничные условия: температура и скорость на входе греющего и нагреваемого теплоносителя.

Результаты и обсуждение. По итогам численного эксперимента получены расходы теплоносителя, температуры на входе и выходе, перепады давления. Ниже представлены контуры температур и скорости в сечениях КТА (рис. 3, 4).

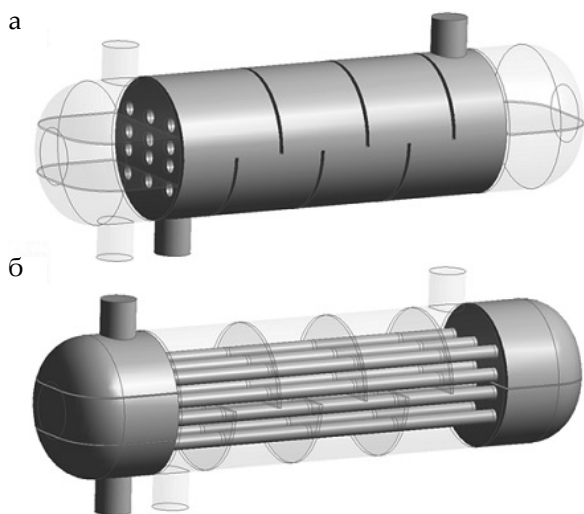


Рис. 1. Геометрия кожухотрубчатого теплообменника:
а – кожух (hot water); б – пучок труб (cold water)

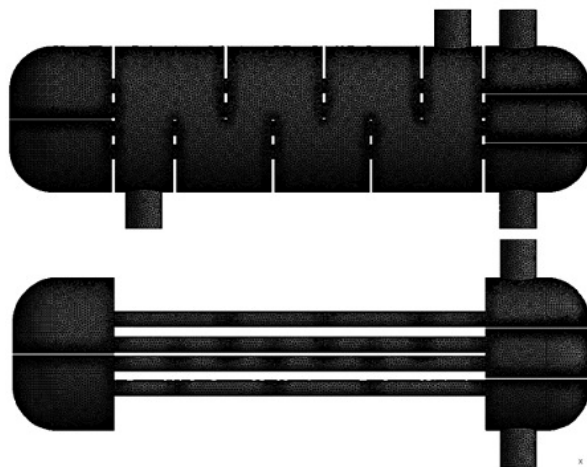


Рис. 2. Расчетная сетка теплообменника

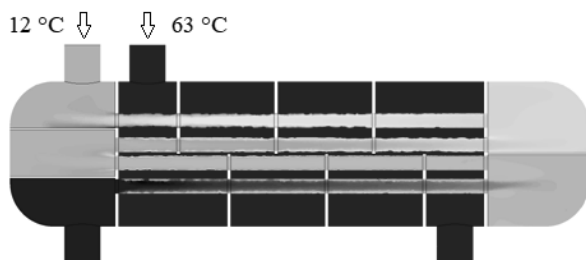


Рис. 3. Контур распределения температуры

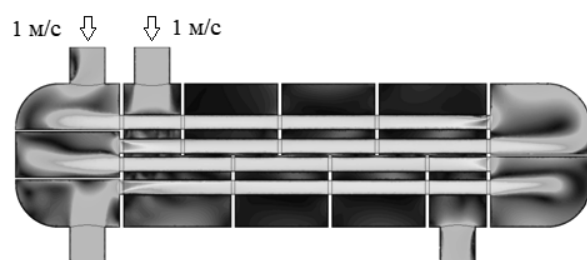


Рис. 4. Контур скорости

Для оценки точности полученных результатов, соответствия расчетной модели реальному теплообменному аппарату проведена верификация результатов теплового расчёта с аналитическим решением методом сравнения площади теплообмена [10].

Из основного уравнения теплопередачи выражаем расчётное значение F . Для расчёта температурного напора принимаем температуры теплоносителей на выходе по результатам решения численной модели.

$$Q = \int_F k \cdot \Delta t \cdot dF. \quad (1)$$

Загрязнения на стенках трубы не учитываются.

Тепловую мощность теплообменного аппарата находим по формуле

$$Q = G \cdot C \cdot (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}), \quad (2)$$

где G – расход теплоносителя; C – теплоёмкость воды; $t_{\text{вых}}$, $t_{\text{вх}}$ – температуры теплоносителя на входе и на выходе в теплообменник соответственно.

Расход греющего и нагреваемого теплоносителей определяется по формуле

$$G = W \frac{\pi d^2}{4}, \quad (3)$$

где W – скорость подачи воды в патрубок; d – диаметр входного патрубка.

Задаёмся температурой греющего теплоносителя на выходе, подбирая подходящую методом последовательных приближений.

$$t_1^{\text{вых}} = t_1^{\text{вх}} - \frac{Q}{G_1 C_{p1}}. \quad (4)$$

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_6 + \Delta t_m}{2}. \quad (5)$$

Так как $\Delta t_6 / \Delta t_m \leq 2$, то с достаточной точностью можно принимать средний температурный напор:

Скорость потока:

$$w_{\text{тр}} = \frac{G_{\text{тр}}}{\rho_{\text{тр}} \cdot f_{\text{тр}}}, \quad (6)$$

где f – проходное сечение.

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} \tag{7}$$

Число Рейнольдса определялось по формуле $Re_{тр} > 10000$, $Re_{мтр} > 10000$, движение в обоих случаях турбулентное.

В случае развитого турбулентного режима движения жидкости в прямых трубах и каналах, т. е. в трубном пространстве, критерий Нуссельта определяется по уравнению

$$Nu_{тр} = 0,021 \cdot \epsilon_1 \cdot Re_{тр}^{0,8} \cdot Pr_{тр}^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_{тр}}{Pr_{1ст}}\right)^{0,25} \tag{8}$$

Коэффициенты теплоотдачи от потока в трубах к внутренней поверхности трубок и от наружной поверхности трубок к потоку в межтрубном пространстве определим по формулам:

$$\alpha_{тр} = \frac{Nu_{тр} \cdot \lambda_{тр}}{d_{вн}} \tag{9}$$

$$\alpha_{мтр} = \frac{Nu_{мтр} \cdot \lambda_{мтр}}{d_{н}} \tag{10}$$

Коэффициент теплопередачи для цилиндрической стенки равен

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}} \tag{11}$$

Площадь теплообмена на основе геометрической модели в DesignModeler определяется по формуле

$$F_M = n l 2 \pi R \tag{12}$$

Площадь, полученная в результате аналитического решения, определяется из уравнения теплопередачи

$$F_a = \frac{Q}{\Delta t \cdot k} \tag{13}$$

Значение площади теплообмена модели сравниваем с аналитическим решением (см. таблицу).

Сравнительный анализ аналитической и численной модели

Показатель	Аналитическое решение	Компьютерное моделирование
Греющий теплоноситель (вода)		
Температура на входе, °С	63	63
Температура на выходе, °С	59	59
Нагреваемый теплоноситель (вода)		
Температура на входе, °С	12	12
Температура на выходе, °С	15,990	15,998
Расход теплоносителя, кг/с	195	195
Число ходов	4	4
Трубки теплообменника		
Диаметр наружный, мм	100	100
Толщина стенки, мм	0,5	0,5
Площадь теплообмена, м	23,5	18,85

Погрешность в расчёте площади теплообмена может быть вызвана наличием в модели поперечных перегородок. В представленном контуре распределения температур видно, что перепад температуры в трубном пучке составляет 3 °С. Это вызвано высокой скоростью движения теплоносителя, а также малым количеством труб в одном ходу. Аналитически полученная скорость в межтрубном пространстве составила 2,1 м/с, что также отражено на полученном в результате моделирования контуре скоростей (рис. 4).

Вывод. В данной работе для оптимизации конструкции трубчатого теплообменника применена методика, которую можно считать типовой для решения задач оптимизации с использованием моделей компьютерной динамики жидкости. Методика включает следующие основные этапы: создание параметризованной геометрической модели, построение сеточной модели на основе автоматического генератора расчетной сетки, формирование расчетной CFD модели (выбор уравнений, выбор модели турбулентности, постановка граничных

условий, верификация и идентификация), создание параметризованного расчетного блока с выводом в качестве параметров критериев оптимизации, задание области оптимизационного поиска, построение поверхности отклика, нелинейная оптимизация по поверхности отклика. Эта методика достаточно универсальна и может применяться во многих других случаях, так как при проектировании зачастую приходится решать задачи оптимизации. С учётом допустимой погрешности, описанной в данной работе, алгоритм решения можно считать оптимальным для сокращения времени и мощности для вычисления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Krasnova N.P., Gorshenin A.S., Rakhimova J.I. Increasing the energy efficiency of the cycle of heat treatment of aluminum ingots // Proceedings of 10th International Scientific and Practical Conference on Water Power. Russian Federation, Kazan, 2018.
2. Krasnova N.P., Gorshenin A.S., Rakhimova J.I. Gas-filled thermal insulation use in heat supply // Proceedings of 10th International Scientific and Practical Conference on Water Power. Russian Federation, Kazan, 2018.
3. Krasnova N.P., Gorshenin A.S., Rakhimova J.I. Constructive factors optimization of the heat exchange model in the cooling chamber // Proceedings of International Workshop on Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering. Russian Federation, Krasnoyarsk, 2019.
4. Четверткова О.В., Ризванов Р.Г., Чернятьева Р.Р. Влияние расстояния между поперечными перегородками и высоты выреза перегородки на тепловую эффективность кожухотрубчатого теплообменника // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2015. №6. С. 452–465.
5. Повышение эффективности кожухотрубных теплообменных аппаратов с применением луночных и полукольцевых выемок / Гуреев В. М. [и др.] // Энергетика Татарстана. 2014. №. 3–4. С. 61–64.
6. Кретинин А.В., Куликова Е.Е., Булыгин К.Д. Оптимизация конструкции теплообменного аппарата методами вычислительной гидромеханики // Вестник ВГТУ. 2015. №5. С. 89–95.
7. Сысоев И.А., Зими́на Т.И., Колмогоровцев И.В. Моделирование распределения температур на поверхности теплообменника в пакете прикладной программы ANSYS // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. №2 (54). С. 54–59.
8. ANSYS CFX. Introduction to CFX. Turbulence. Chapter 9. ANSYS, Inc, 2009, Vol. 7.
9. Шишкин Б.В. Конструирование и эксплуатация теплообменных аппаратов. Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2011. 128 с.
10. Савельев Н. И., Лукин П. М. Расчет и проектирование кожухотрубчатых теплообменных аппаратов. Чебоксары: Изд-во Чуваш.ун-та, 2010. 292 с.

REFERENCES

1. Krasnova, N.P., Gorshenin, A.S., Rakhimova, J.I. Increasing the energy efficiency of the cycle of heat treatment of aluminum ingots. Proceedings of 10th International Scientific and Practical Conference on Water Power. Kazan, 2018 (in Russian).
2. Krasnova, N.P., Gorshenin, A.S., Rakhimova, J.I. Gas-filled thermal insulation use in heat supply. Proceedings of 10th International Scientific and Practical Conference on Water Power. Kazan, 2018 (in Russian).
3. Krasnova, N.P., Gorshenin, A.S., Rakhimova, J.I. Constructive factors optimization of the heat exchange model in the cooling chamber. Proceedings of International Workshop on Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering. Krasnoyarsk, 2019 (in Russian).
4. Chetvertkova O.V., Rizvanov R.G., Chernyat'eva R.R. The effect of the distance between the transverse partitions and the height of the cutout of the partition on the thermal efficiency of the shell-and-tube heat exchanger. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal «Neftegazovoe delo»* [Electronic scientific journal "Oil and Gas Business"], 2015, no.6, pp. 452-465. (in Russian)
5. Gureev V. M. Improving the efficiency of shell-and-tube heat exchangers using hole and half-ring recesses. *Energetika Tatarstana* [Energy of Tatarstan], 2014, no.3-4, pp.61-64. (in Russian)
6. Kretinin A.V., Kulikova E.E., Bulygin K.D. Optimization of the design of the heat exchanger by methods of computational hydromechanics. *Vestnik VGTU* [Voronezh State Technical University Bulletin], 2015, no.5, pp.89-95. (in Russian)
7. Sysoev I.A., Zimina T.I., Kolmogortsev I.V. Modeling the temperature distribution on the surface of a heat exchanger in the ANSYS application package. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyy analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2017, no.2 (54), pp.54-59. (in Russian)
8. ANSYS CFX. Introduction to CFX. Turbulence. Chapter 9. ANSYS, Inc, 2009, Vol. 7.
9. Shishkin B.V. *Konstruirovaniye i ekspluatatsiya teploobmennyykh apparatov: ucheb.posobie* [Design and operation of heat exchangers]. Komsomolsk-na-Amure, GOUVPO «KnAGTU», 2011. 128p.
10. Savel'ev N. I., Lukin P. M. *Raschet i proektirovaniye kozhukhotrubchatykh teploobmennyykh apparatov* [Calculation and design of shell-and-tube heat exchangers] Chelboksary, Izd-vo Chuvash.un-ta, 2010. 292 p.

Об авторах:

ГОРШЕНИН Андрей Сергеевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры
промышленной теплоэнергетики
Самарский государственный технический университет
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

GORSHENIN Andrey S.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the
Industrial Heat Power Engineering Chair
State Technical University
443100, Russia, Samara, Molodogvardeiskaya str., 244

КРАСНОВА Наталья Петровна

старший преподаватель кафедры промышленной
теплоэнергетики
Самарский государственный технический университет
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: krasnova-pt@yandex.ru

KRASNOVA Natalya Petrovna

Senior Lecturer of the
Industrial Heat Power Engineering Chair
State Technical University
443100, Russia, Samara, Molodogvardeiskaya str., 244
Email: krasnova-pt@yandex.ru

РАХИМОВА Юлия Игоревна

кандидат педагогических наук, доцент, доцент
кафедры промышленной теплоэнергетики
Самарский государственный технический университет
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: juliyrakhimova@yandex.ru

RAKHIMOVA Julia Igorevna

PhD in Pedagogics, Associate Professor of the
Industrial Heat Power Engineering Chair
State Technical University
443100, Russia, Samara, Molodogvardeiskaya str., 244
Email: juliyrakhimova@yandex.ru

Для цитирования: Горшенин А.С., Краснова Н.П., Рахимова Ю.И. Численное моделирование кожухотрубчатого теплообменника в программном продукте Ansysfluent // Градостроительство и архитектура. 2020. Т.10, № 4. С. 174–179. DOI: 10.17673/Vestnik.2020.04.21.

For citation: Gorshenin A.S., Krasnova N.P., Rakhimova Yu.I. Numerical Simulation of Shell and Tube Heat Exchanger in Ansysfluent Software. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2020, vol. 10, no. 4, Pp. 174–179. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2020.04.21.

**ИНЖЕНЕРНЫЙ ЦЕНТР
«КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭНЕРГОАУДИТ»**

