



УДК 66.045.123, 66.045.124

Крутова Ираида Александровна

инженер-технолог

E-mail: iraida_knyazeva@mail.ru

Ассоциация «Вятский лазерный инновационно-технологический центр»

Адрес организации: 610004, Россия, г. Киров, ул. Заводская, д. 1

Золотонос Яков Давидович

доктор технических наук, профессор

E-mail: zolotonosov@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Компьютерное моделирование гидродинамики и теплообмена в конических змеевиковых теплообменниках типа «труба в трубе»

Аннотация

Постановка задачи. Цель данной работы – численное моделирование процессов гидродинамики и теплообмена в конических змеевиковых теплообменных аппаратах типа «труба в трубе» с теплообменным элементом в виде гладкой трубы, оценка энергетической эффективности таких аппаратов.

Результаты. Основные результаты исследования состоят в том, что авторами в ходе работы были разработаны модель и алгоритм расчета конических змеевиковых теплообменных аппаратов типа «труба в трубе», реализованные в программе Ansys, определены теплогидродинамические показатели змеевиковых аппаратов.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в возможности применения для технологических нужд современного более эффективного и компактного теплообменного оборудования и в обосновании этого выбора. Так, при равных исходных данных, конические теплообменники являются более эффективными по сравнению с цилиндрическими с теплообменным элементом в виде гладкой трубы, так как для достижения необходимых теплогидродинамических показателей они имеют меньшую поверхность теплообмена.

Ключевые слова: гидродинамика, теплообмен, теплообменный аппарат, пружинно-витой канал, змеевик, Ansys Fluent.

Для цитирования: Крутова И. А., Золотонос Я. Д. Компьютерное моделирование гидродинамики и теплообмена в конических змеевиковых теплообменниках типа «труба в трубе» // Известия КГАСУ. 2020. № 3 (53). С. 65–73.

1. Введение

Теплообменные аппараты получили широкое распространение от ЖКХ до ядерной и авиастроительной отраслей промышленности. Современные теплообменные аппараты должны быть высокоэффективными, надежными в эксплуатации, иметь небольшую стоимость и соответственно, массогабаритные показатели.

Благодаря компактным размерам широкое применение в промышленности нашли змеевиковые теплообменные аппараты. Основным узлом которых является теплообменный элемент – змеевик, представляющий собой трубу, обычно круглого поперечного сечения, плоской или объемной конфигурации. Форма змеевика может быть различной: плоская спиральная, зигзагообразная, объемная цилиндрическая, объемная коническая и т.д., она подбирается исходя из теплофизических свойств теплоносителей, требуемой мощности теплообменного аппарата и в зависимости от схемы взаимодействия теплоносителей [1].

Большое количество научных работ посвящено исследованию процессов гидродинамики и теплообмена, протекающих в цилиндрических змеевиковых теплообменниках. Так, первые работы, посвященные математическому описанию течения жидкости в криволинейной трубе, были опубликованы еще 1927-1928 годах Dean

W.R. Было отмечено, что снижение скорости потока обусловлено кривизной канала и зависит от одной переменной – K , которая равна $2(Re)^2 \cdot r/R$, для низких скоростей и малых значений соотношения r/R .

Результаты многочисленных исследований показывают, что цилиндрические теплообменники обладают более высокой эффективностью по сравнению с прямолинейными теплообменными аппаратами за счет более высокого перепада давления [2, 3].

Несколькими коллективами авторов были проведены исследования повышения эффективности теплообмена в цилиндрических змеевиковых теплообменниках и изучение влияния геометрических размеров на эффективность теплообмена [4-6].

В работе [4] показано, что с увеличением диаметра трубки при неизменном диаметре змеевика коэффициент кривизны увеличивается, что приводит к росту интенсивности вторичных течений жидкости и росту числа Nu . Следовательно, наиболее эффективными являются цилиндрические змеевики маленького диаметра и большого диаметра трубы.

Шаг намотки имеет значение только в развивающемся участке теплообмена, а при установившемся режиме соотношение Nu_{loc}/Nu_{av} практически не зависит от параметров змеевика и числа De .

Трехмерное моделирование гидродинамики и теплообмена в цилиндрическом змеевиковом теплообменнике представлено в работе [5]. Результаты расчетов, полученные при помощи модуля CFD, согласуются с экспериментальными результатами в пределах экспериментальной погрешности. На основании полученных результатов были разработаны уравнения для расчета коэффициента теплоотдачи спирального змеевика.

Работы [6, 7] посвящены обзору научных статей, содержащих анализ параметров потока и оценку характеристик теплообмена, а также математическому моделированию цилиндрических змеевиковых теплообменников.

Как видно процессы гидродинамики и теплообмена в цилиндрическом змеевике хорошо изучены, чего нельзя сказать о теплообменных аппаратах с коническими змеевиками.

Идея замены цилиндрических змеевиковых теплообменных аппаратов на конические заключается в том, что, уже на первых витках змеевика, температура нагреваемой воды повышается, её кинематическая вязкость снижается и, соответственно, Рейнольдс увеличивается, что приводит к повышению коэффициента теплоотдачи. В связи с этим появляется возможность сокращения площади теплообмена (габаритных размеров теплообменного аппарата). Рост коэффициента теплоотдачи обусловлен, в том числе, и ростом кривизны змеевика.

Коллективом авторов Purandare, Pramod S. и др. рассматриваются характеристики теплопередачи и падения давления в коническом змеевиковом теплообменном аппарате, помещенном в цилиндрический корпус с различными углами конуса и диаметром трубы [8-10]. Экспериментально исследуются змеевики с углом конуса 0° (цилиндр), 45° , 90° , 135° и 180° (спираль). По результатам исследований были сделаны следующие выводы: число Нуссельта имеет наибольшее значение для цилиндрического змеевика и наименьшее – для спирального, а для конического змеевика это значение уменьшается с увеличением угла конуса.

Экспериментальные исследования [9], проведенные для конического теплообменника с углом конуса 90° показали, что коэффициент теплопередачи (h_i) увеличивается с увеличением числа Re_i для постоянного расхода холодной воды, но уменьшается с увеличением расхода холодной воды при постоянном значении числе Re_i .

Анализ показывает, что число Nu и коэффициент трения f являются функциями скоростей потока, диаметра трубки, коэффициента кривизны и угла конуса. Число Nu увеличивается с увеличением скорости потока в трубном пространстве, тогда как уменьшается с увеличением скорости потока, обтекающего змеевик, с ростом угла конуса и диаметра трубки.

На сегодняшний день актуально применение теплообменников типа «труба в трубе», обладающих меньшим гидравлическим сопротивлением, а значит более высокими скоростями движения теплоносителей (до 3 м/с), что обеспечивает более высокое значение коэффициента теплоотдачи и небольшой расход теплоносителей. Также преимуществом такого теплообменного аппарата является разнообразие компоновок, а при необходимости поверхность теплообмена может быть увеличена за счет установки дополнительных секций.

Работа [11] посвящена экспериментальным и численным исследованиям теплопередачи и характеристик ламинарного течения жидкости в коническом змеевиковом двухтрубном теплообменнике. Математическая модель подтверждена результатами эксперимента. Результаты показали, что числа De в трубном и межтрубном пространстве оказывают существенное влияние на число Nu . Использование конического теплообменника вместо спирального типа приводит к повышению общего коэффициента теплопередачи, а также росту коэффициента трения. Наиболее высокая эффективность теплообмена наблюдается в аппаратах с углом конуса от 65 до 85° .

Как видно из анализа научно-технической литературы, конические змеевиковые аппараты в настоящее время представляют интерес с точки зрения развития теплообменного оборудования, так как обладают более высокой эффективностью. Таким образом, моделирование и изучение процессов теплообмена и гидродинамики в таких аппаратах является актуальной задачей.

Целью настоящей работы является исследование эффективности замены гладкостенного теплообменного элемента на пружинно-витой канал с применением программного комплекса Ansys Fluent.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

- построение трехмерных моделей конического змеевикового теплообменного аппарата на базе пружинно-витого канала и гладкостенной трубы;
- численное моделирование теплообмена в трубном и межтрубном пространствах для змеевиковых конических теплообменных аппаратов типа «труб в трубе» с теплообменным элементом в виде гладкой трубы и пружинно-витым каналом;
- определение тепловых и гидравлических характеристик;
- оценка и анализ полученных результатов.

2. Материалы и методы

В данной работе объектом исследования является конический змеевиковый теплообменник (рис. 1), который работает следующим образом: при противоточной схеме движения теплоносителей холодная вода через штуцер 1 поступает во внутреннюю медную трубу, одновременно через штуцер 2, установленный во внешнем стальном змеевике, в межтрубное пространство подается горячая вода.



Рис. 1. Конический змеевиковый теплообменник типа «труба в трубе» [12]

Для расчета были предварительно заданы следующие характеристики:

- геометрические параметры теплообменного аппарата представлены в табл. 1;
- параметры теплоносителей указаны в табл. 2.

Таблица 1

Геометрические параметры конического змеевикового теплообменного аппарата

№	Параметр	Значение
1	Число витков	6
2	Диаметр трубы внутреннего змеевика, мм	15
3	Диаметр трубы внешнего змеевика, мм	35
4	Шаг змеевика, мм	70
5	Диаметр нижнего основания, мм	581
6	Диаметр верхнего основания, мм	324
7	Высота теплообменника, мм	420
8	Толщина стенок внутреннего и внешнего змеевика, мм	2
9	Диаметр проволоки пружинно-витого канала, мм	2

Таблица 2

Параметры горячего и холодного теплоносителя

№	Параметр	Значение
1	Температура горячей воды на входе, °C	75
2	Температура холодной воды на входе, °C	10
3	Расход горячей воды, кг/час	945
4	Расход холодной воды, кг/час	787

Расчетная сетка для модели строилась с использованием программы Ansys Meshing гексаэдрическая для твердых тел и тетраэдрическая для жидкостей.

На рис. 2 представлена расчетная сетка для модели конического змеевикового теплообменника.

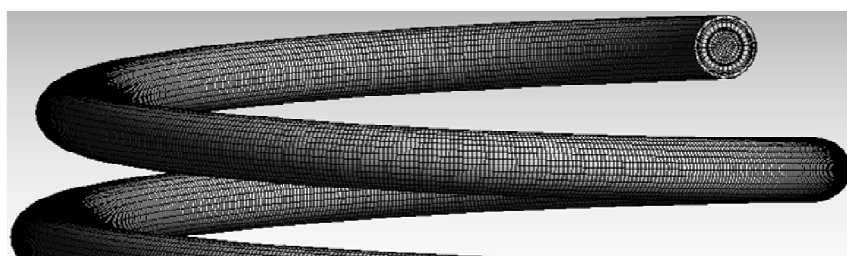


Рис. 2. Расчетная сетка для модели конического змеевикового теплообменника (иллюстрация авторов)

Для решения поставленной задачи был выбран решатель Pressure-Based, подключено уравнение энергии, задавалась модель турбулентности $k-\varepsilon$ RNG, на стенках задавалось условие прилипания алгоритм численного решения SIMPLEC.

3. Результаты и обсуждение

Исследование заключалось в решении стационарной задачи для разных геометрических моделей змеевикового теплообменника. В табл. 3 представлены полученные результаты.

Таблица 3

Результаты расчетов

Форма теплообменного аппарата	Конический
Число витков N	6
Диаметр внутреннего змеевика, мм	15
Температура горячей воды на выходе, °C	47,33
Температура холодной воды на выходе, °C	42,44
Скорость во внутреннем змеевике, м/с	1,26
Скорость в межтрубном пространстве, м/с	0,48

Адекватность полученных результатов подтверждается результатами расчета теплового баланса.

Пример распределения температуры по поверхности змеевика приведен на рис. 3-4.

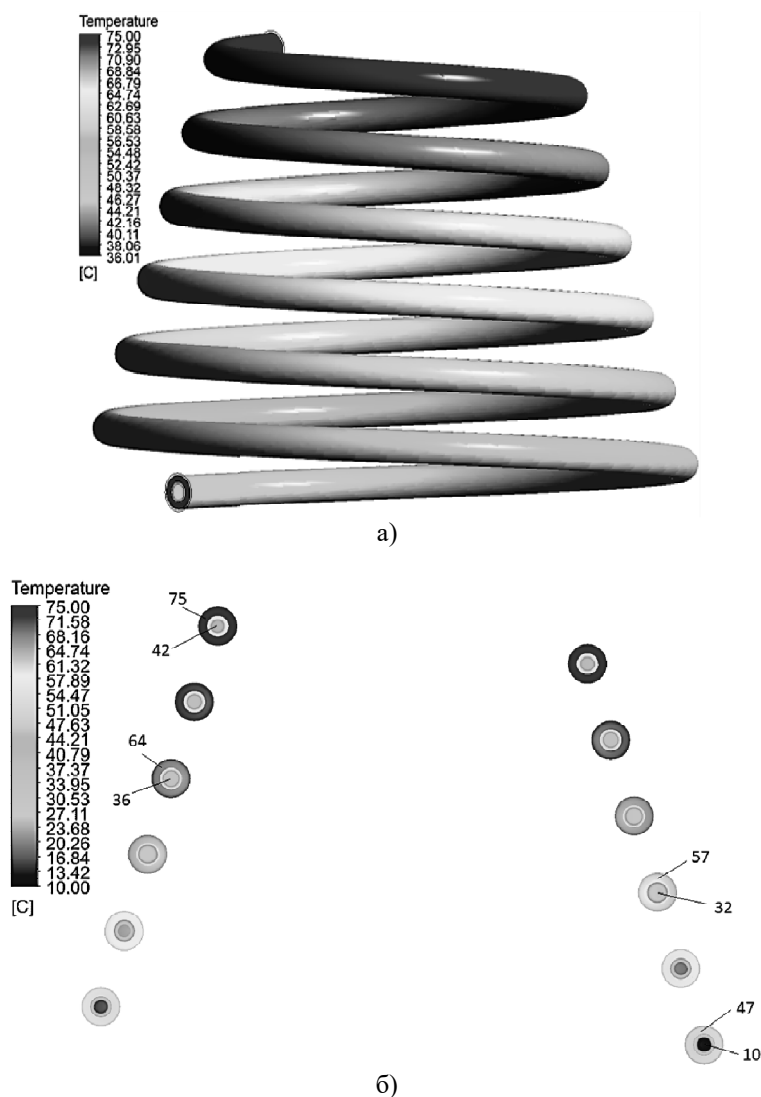


Рис. 3. Распределение температуры теплоносителей по длине конического змеевика (иллюстрация авторов)

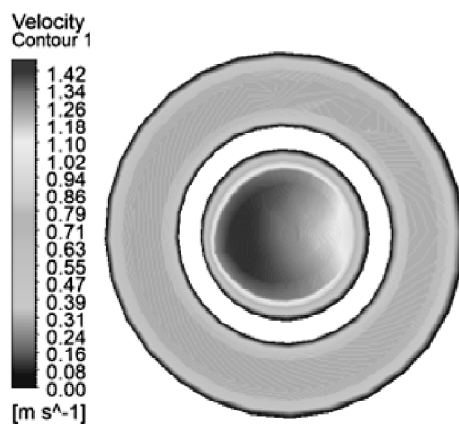


Рис. 4. Распределение скорости потоков по сечению змеевика (иллюстрация авторов)

4. Обсуждение

При движении жидкости по криволинейной траектории змеевика, появляются центробежные силы, значения которых по сечению канала различны [13-15]. На оси трубы, где скорость максимальна, эти силы имеют наибольшее значение. В направлении стенок трубы скорость теплоносителя снижается, и влияние центробежного эффекта становится меньше. Такое распределение сил по сечению изогнутого канала приводит к возникновению поперечной вторичной циркуляции. Полное развитие поперечных потоков достигается после прохождения теплоносителем участка гидродинамической стабилизации, а движение теплоносителя в этом случае происходит по винтовой линии, параметры (шаг, диаметр) которой зависят от соотношения поперечной и осевой скоростей [12]. Вторичная циркуляция наблюдается как при ламинарном режиме, так и при турбулентном режиме течения.

Благодаря возникающей поперечной циркуляции фактическая скорость жидкости в изогнутой трубе значительно превышает среднюю скорость осевого потока, это приводит к существенному усилению обмена энергией между ядром потока и ламинарным подслоем и, как следствие, к резкому увеличению гидравлического сопротивления.

Благодаря наличию поперечных составляющих скорости – тангенциальной и радиальной, усиливается конвективный перенос импульса, энергии, изменяется вихревая структура внутренних закрученных потоков, что является предпосылкой для интенсификации теплообмена.

Данные теоретические предпосылки подтверждаются полученными результатами, так коэффициент теплоотдачи для трубного пространства составляет $6788 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$, а для межтрубного – $4706 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$.

5. Заключение

1. В данной работе был использован численный метод для моделирования стационарного режима теплопередачи и гидродинамики жидкости нагреваемой воды в межтрубном пространстве змеевикового конического теплообменного аппарата. В качестве модели турбулентности была выбрана модель $k-\varepsilon$ RNG.

2. Было установлено, что применение конического змеевикового теплообменного аппарата типа «труб в трубе» с геометрическими параметрами, указанными в табл. 1, позволяет нагреть холодную воду от 10 до 42°С при подаче в межтрубное пространство горячего теплоносителя с начальной температурой 75°С .

3. Как видно из рис. 4, распределение скорости теплоносителей в поперечном сечении змеевика носит неравномерный характер, что особенно заметно в трубном пространстве. Наибольшая скорость, равная $1,42 \text{ м/с}$, наблюдается у внешней стенки внутреннего змеевика. В межтрубном пространстве также можно выделить несколько областей, характеризующихся разной скоростью: это ламинарный подслой вблизи труб, скорость которого стремится к 0, переходный слой, скорость которого равна $0,39 \text{ м/с}$ и ядро потока, скорость которого – $0,55 \text{ м/с}$.

Таким образом, подтверждается неравномерность распределения скоростей, которая приводит к росту обмена энергией между ядром потока и ламинарным подслоем и, следовательно, к увеличению гидравлического сопротивления.

Список библиографических ссылок

1. Генералов М. Б., Александров В. П., Алексеев В. В. и др. Машиностроение: энциклопедия, Т. IV-12, Машины и аппараты химических и нефтехимических производств. Расчет и конструирование машин. М. : Машиностроение, 2004. 829 с.
2. Alimoradi A., Veysi F. Optimal and critical values of geometrical parameters of shell and helically coiled tube heat exchangers // Case Studies in Thermal Engineering. 2017. Vol. 10. P. 73–78. DOI: 10.1016/j.csite.2017.03.003.

3. Sheeba A., Abhijith C. M., Prakash J. Experimental and numerical investigations on the heat transfer and flow characteristics of a helical coil heat exchanger // International Journal of Refrigeration. 2018. Vol. 99. P. 490–497. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2018.12.002.
4. Jayakumar J. S. Helically Coiled Heat Exchangers, Heat Exchangers – Basics Design Applications, 2012. URL: <http://www.intechopen.com/books/heat-exchangers-basics-design-applications/helically-coiled-heatexchangers>. DOI: 10.5772/1997.
5. Maradona R., Rajkumar S. CFD Analysis of Heat Transfer Characteristics of Helical Coil Heat Exchangers // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 787. P. 172–176. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.787.172.
6. Bhuvaneswari S., Elatharasan G. A Study of the Literature Review on Heat Transfer in A Helically Coiled Heat Exchanger // RTICCT-2019 Conference Proceedings. 2019. Vol. 7. Iss. 1. P. 1–3.
7. Singh V., Verma S., Dradhomar P., Dradhomar P., Manjunatha M. Review on CFD analysis of double tube helical coil heat exchanger // International Journal of Advanced Research. 2017. Vol. 5. Iss. 4. P. 1758–1762. DOI: 10.21474/IJAR01/4007.
8. Purandare P., Lele Dr M., Gupta R. Investigation on thermal analysis of conical coil heat exchanger // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. Vol. 90. P. 1188–1196. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.044.
9. Purandare P., Lele Dr M., Gupta R. Experimental investigation on heat transfer analysis of conical coil heat exchanger with 90 degrees cone angle // Heat and mass transfer. 2014. Vol. 51. Iss. 3. P. 373–379. DOI: 10.1007/s00231-014-1418-x
10. Purandare P., Lele Dr M., Gupta R. Experimental investigation on heat transfer and pressure drop of conical coil heat exchanger // Thermal science. 2016. Vol. 20. Iss. 6. P. 2087–2099. DOI: 10.2298/tsci140802137p.
11. Sheeba A., Akhil R., Prakash J. Heat Transfer and Flow Characteristics of a Conical Coil Heat Exchanger // International Journal of Refrigeration. 2020. Vol. 110. P. 268–276. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2019.10.006
12. Золотонос Я. Д., Багоутинова А. Г. Змеевиковые теплообменники. Моделирование, расчет. Казань : КГАСУ, 2016. 245 с.
13. Золотонос Я. Д., Вачагина Е. К., Багоутдинова А. Г., Крутова И. А. Инновационные змеевиковые теплообменные аппараты. М. : ВИНТИ. 2017. Т. 91. 180 с.
14. Аронов И. З. О теплообмене при движении жидкости в винтовых змеевиках // Теплоэнергетика. 1961. Т. 6. С. 75–77.
15. Багоутдинова А. Г., Золотонос Я. Д. Расчет и оценка эффективности змеевиковых теплообменников типа «труба в трубе» с изменяющимся радиусом изгиба винтовой спирали // Известия вузов. Строительство. 2017. Т. 1. С. 98–107.

Krutova Iraida Alexandrovna

engineer technologist

E-mail: iraida_knyazeva@mail.ru

Association «Vyatka Laser Innovation and Technological Center»

The organization address: 610004, Russia, Kirov, Zavodskaya st., 1

Zolotonosov Yakov Davidovich

doctor of technical sciences, professor

E-mail: zolotonosov@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Computer simulation of fluid flow and heat transfer in conical coiled heat exchangers of the «pipe-in-pipe» type

Abstract

Problem statement. The aim of the work is to numerically simulate the processes of hydrodynamics and heat transfer in conical coil heat exchangers of the «pipe-in-pipe» type with

a heat-exchange element in the form of a smooth pipe, to assess the energy efficiency of such devices.

Results. The main results of the study are that in the course of the work, the authors developed a model and an algorithm for calculating tapered coil heat exchangers of the «pipe in pipe» type, implemented in the Ansys program, and determined the thermo- hydrodynamic indicators of the coil devices.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry lies in the possibility of using modern, more efficient and compact heat exchange equipment for the technological needs and justifying this choice. Therefore, with equal initial data, conical heat exchangers are more efficient in comparison with cylindrical ones with a heat exchange element in the form of a smooth tube, since they have a smaller heat exchange surface to achieve the required thermo- hydrodynamic parameters.

Keywords: hydrodynamics, heat exchange, heat exchanger, spring-coiled channel, coil, Ansys Fluent.

For citation: Krutova I. A., Zolotonosov Y. D. Computer simulation of fluid flow and heat transfer in conical coiled heat exchangers of the «pipe-in-pipe» type // Izvestija KGASU. 2020. № 3 (53). P. 65–73.

References

1. Generalov M. B., Aleksandrov V. P., Alekseev V. V. et al. Mechanical engineering: an encyclopedia, T. IV-12, Machines and devices of chemical and petrochemical industries. Calculation and design of machines. M.: Mashinostroyeniye, 2004. 829 p.
2. Alimoradi A., Veysi F. Optimal and critical values of geometrical parameters of shell and helically coiled tube heat exchangers // Case Studies in Thermal Engineering. 2017. Vol. 10. P. 73–78. DOI: 10.1016/j.csite.2017.03.003.
3. Sheeba A., Abhijith C. M., Prakash J. Experimental and numerical investigations on the heat transfer and flow characteristics of a helical coil heat exchanger // International Journal of Refrigeration. 2018. Vol. 99. P. 490–497. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2018.12.002.
4. Jayakumar J. S. Helically Coiled Heat Exchangers, Heat Exchangers – Basics Design Applications, 2012. URL: <http://www.intechopen.com/books/heat-exchangers-basics-design-applications/helically-coiled-heatexchangers>. DOI: 10.5772/1997.
5. Maradona R., Rajkumar S. CFD Analysis of Heat Transfer Characteristics of Helical Coil Heat Exchangers // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 787. P. 172–176. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.787.172.
6. Bhuvanewari S., Elatharasan G. A Study of the Literature Review on Heat Transfer in A Helically Coiled Heat Exchanger // RTICCT-2019 Conference Proceedings. 2019. Vol. 7. Iss. 1. P. 1–3.
7. Singh V., Verma S., Dradhomar P., Dradhomar P., Manjunatha M. Review on CFD analysis of double tube helical coil heat exchanger // International Journal of Advanced Research. 2017. Vol. 5. Iss. 4. P. 1758–1762. DOI: 10.21474/IJAR01/4007.
8. Purandare P., Lele Dr M., Gupta R. Investigation on thermal analysis of conical coil heat exchanger // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. Vol. 90. P. 1188–1196. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.044.
9. Purandare P., Lele Dr M., Gupta R. Experimental investigation on heat transfer analysis of conical coil heat exchanger with 90 degrees cone angle // Heat and mass transfer. 2014. Vol. 51. Iss. 3. P. 373–379. DOI: 10.1007/s00231-014-1418-x
10. Purandare P., Lele Dr M., Gupta R. Experimental investigation on heat transfer and pressure drop of conical coil heat exchanger // Thermal science. 2016. Vol. 20. Iss. 6. P. 2087–2099. DOI: 10.2298/tsci140802137p.
11. Sheeba A., Akhil R., Prakash J. Heat Transfer and Flow Characteristics of a Conical Coil Heat Exchanger // International Journal of Refrigeration. 2020. Vol. 110. P. 268–276. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2019.10.006

12. Zolotonosov Ya. D., Bagoutinova A. G. Coil heat exchangers. Modeling, calculation. Kazan: KGASU, 2016. 245 p.
13. Zolotonosov Ya. D., Vachagina E. K., Bagoutdinova A. G., Krutova I. A. Innovative coil heat exchangers. M. :VNITI. 2017. V. 91. 180 p.
14. Aronov I. Z. On heat exchange during fluid motion in helical coils // Teploenergetika. 1961. V. 6. P. 75–77.
15. Bagoutdinova A. G., Zolotonosov Ya. D. Calculation and evaluation of the efficiency of pipe-in-pipe coil heat exchangers with a variable bending radius of the helical spiral // Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo. 2017. V. 1. P. 98–107.