

УДК 536.2

**АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В РЕБРАХ ТЕПЛООБМЕННОГО  
АППАРАТА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ****Болков Ярослав Сергеевич,**  
преподаватель кафедры ПТЭ,**Воронина Мария Васильевна,**  
студент,**Олиниченко Алёна Юрьевна,**  
студент,**Исупова Полина Артемовна,**  
студент,**Бабкин Дмитрий Владимирович,**  
студент,Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск  
454080, РФ, г. Челябинск пр. Ленина, 76 E-mail: iar-bolkov@yandex.ru**Аннотация**

Целью статьи является получение температурного поля и теплового потока на оребренной трубе методом конечных элементов (МКЭ). Для этого была проведено математическая моделирование среднего теплового потока на внешней поверхности трубы с использованием программного пакета ANSYS Steady Thermal.

**Ключевые слова:** теплообменники, оребрение, тепловой поток, стационарная теплопроводность, граничные условия.

**ANALYSIS OF THE TEMPERATURE FIELD IN THE FINS OF A HEAT  
EXCHANGER USING THE FINITE ELEMENT METHOD****Yaroslav S. Bolkov,**  
lecturer of the Heat and power engineering department,**Maria V. Voronina,**  
student,**Alyona Y. Olinichenko,**  
student,

**Polina A. Isupova,**  
student,

**Dmitry V. Babkin,**  
student,

South Ural State University, Chelyabinsk 454080, Russian Federation, Chelyabinsk ave. Lenin, 76  
E-mail: iar-bolkov@yandex.ru

---

## ABSTRACT

---

The purpose of the article is to obtain the temperature field and heat flow on a finned tube by the finite element method (FEM). For this, mathematical modeling of the average heat flux on the outer surface of the pipe was carried out using the ANSYS Steady Thermal software package.

---

**Keywords:** heat exchangers, fins, heat flow, stationary thermal conductivity, boundary conditions.

---

## Введение

В настоящее время одним из приоритетных направлений развития энергетической отрасли РФ является переход к ресурсосберегающей энергетике [1]. Развитие в этом направлении возможно благодаря повышению надежности и энергетической эффективности оборудования; в настоящей статье эта задача будет рассмотрена с точки зрения анализа работы теплообменного оборудования. Широкое применение в сфере производства и передачи тепловой энергии получили трубчатые теплообменные аппараты ввиду простоты технологии их изготовления. Среди преимуществ такого типа теплообменников также можно выделить их высокие прочностные свойства и удобство компоновки труб. Так как в технологических процессах производства (в сфере ЖКХ, а также в энергетическом, химическом, пищевом секторе экономики) теплоносители транспортируются под избыточным давлением, целесообразно с точки зрения оптимального гидравлического режима использовать трубы круглого сечения.

Одним из способов интенсификации теплообмена является использование ребристых поверхностей. Последние получили широкое применение в промышленности и в сфере ЖКХ. Оребрение труб позволяет повысить количество передаваемой теплоты благодаря увеличению площади поверхности теплообмена. Ребра возможно изготовить из материалов, стойких к образованию коррозии, агрессивным средам, что позволяет повысить срок эксплуатации теплообменного аппарата. При проектировании теплообменного аппарата необходимы тепловой, конструктивный, гидравлический, компоновочный и экономический расчеты. Целью теплового расчета является анализ распределения температур теплоносителей и поверхности теплообмена. Расчет включает решение задачи на стационарный теплообмен с оребренной поверхности, представленный в настоящей работе. Результаты расчета будут использованы для верификации решения задачи другим методом - методом конечных элементов (МКЭ). Цель исследования - получить температурное поле и тепловой поток на оребренной трубе методом конечных элементов (МКЭ) с инженерной точностью до 5%.

### Материалы и методы

В качестве объекта исследования взят участок оребренной трубы длиной 97,2 мм и наружным диаметром 32мм. Материал трубы и ребер – сталь со средним коэффициентом теплопроводности 52 Вт/(м·°С). Средняя температура теплоносителя внутри канала трубы 250°С, температура омывающего наружную поверхность участка трубы теплоносителя составляет 475°С. Ребро имеет наружный диаметр 58 мм и толщину 1,2 мм, шаг между ребрами постоянен и равен 4,8 мм. Коэффициент теплоотдачи со стороны внутренней поверхности равен 5100Вт/(м<sup>2</sup>·°С). На внешней (межреберной) поверхности трубы коэффициент теплоотдачи составляет 88Вт/(м<sup>2</sup>·°С). Коэффициент теплоотдачи с ребер составляет 120 Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

Теоретический расчет ведется для участка трубы с установившимся температурным режимом, расчет ведется для ребра конечного размера [2].

Параметр ребра:

$$m = \sqrt{\frac{2\alpha_2}{\lambda_{cm} \delta_p}}$$

Эквивалентная высота ребра:

$$h_3 = \frac{D_p - d_2}{2} \left(1 + 0,35 \ln \frac{D_p}{d_2}\right)$$

Коэффициент эффективности ребра:

$$E = \frac{th(mh_3)}{mh_3}$$

Коэффициент оребрения:

$$k_p = \frac{f_p + f_c}{f_2}$$

Удельная плотность теплового потока с одного метра трубы:

$$q_l = \frac{\pi d_2 (t_{ж1} - t_{ж2})}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2 [1 + E(k_p - 1)]}}$$

По итогам расчета получим плотность теплового потока 10127,22 Вт/м.

Так как коэффициенты теплоотдачи заранее посчитаны для свободно конвективного теплообмена на наружной поверхности ребер и межреберной поверхности и для вынужденного теплообмена конвекцией в канале трубы, то конечно-элементный анализ применяется исключительно к твердотельной зоне. Таким образом, решается задача на стационарную теплопроводность оребренной поверхности части теплообменного

аппарата. При такой постановке задачи возможно провести численный анализ программным пакетом ANSYS Steady Thermal. Такой способ исследования менее требователен к вычислительным мощностям по сравнению с аналогичным исследованием в ANSYS Fluent, где число элементов и узлов значительно больше. [3-7].

В качестве граничных условий задаются средние температуры теплоносителей, коэффициент теплопроводности стали. Геометрическая модель представлена на рисунке 1.

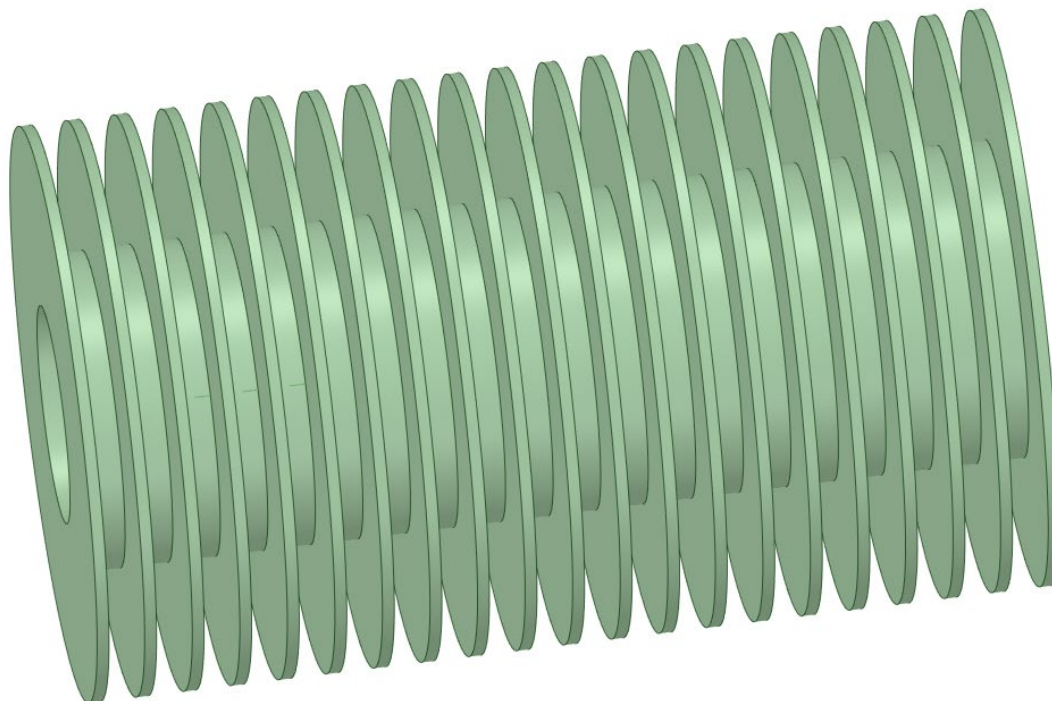


Рисунок 1 – Геометрическая модель

После построения геометрической модели производится разбиение модели на конечное число объемов (см. рисунок 2):

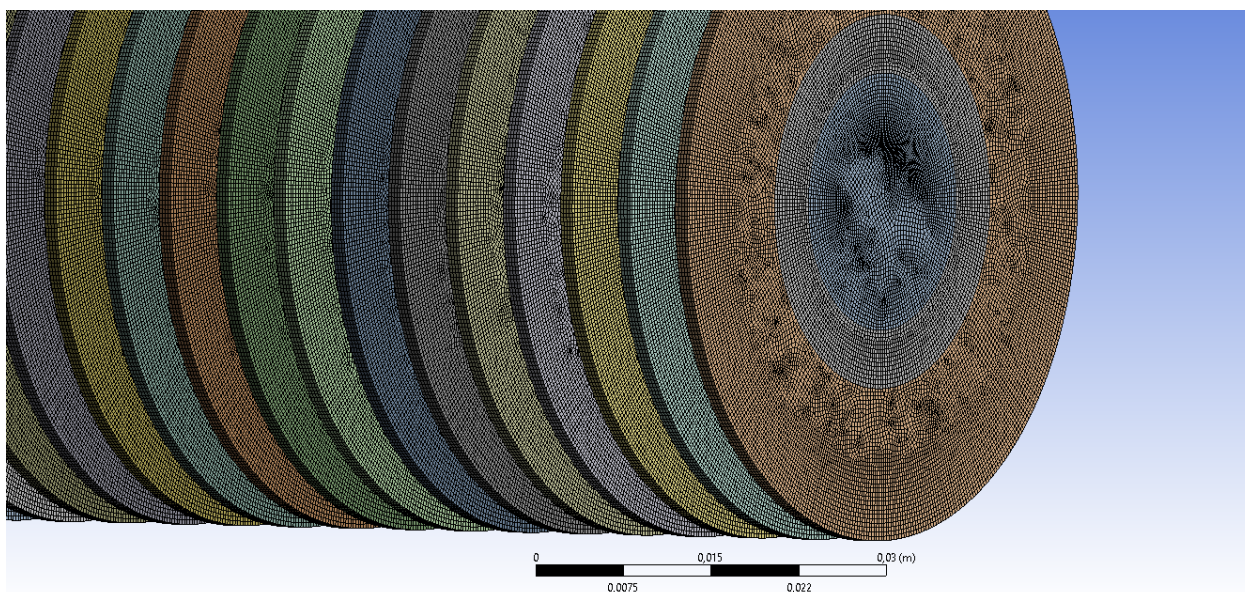


Рисунок 2 – Вид модели с сеткой

Характеристики сетки: количество узлов – 25503 шт.; количество элементов – 11993 шт.  
 Результаты численного моделирования представлены на рисунках 3 и 4.

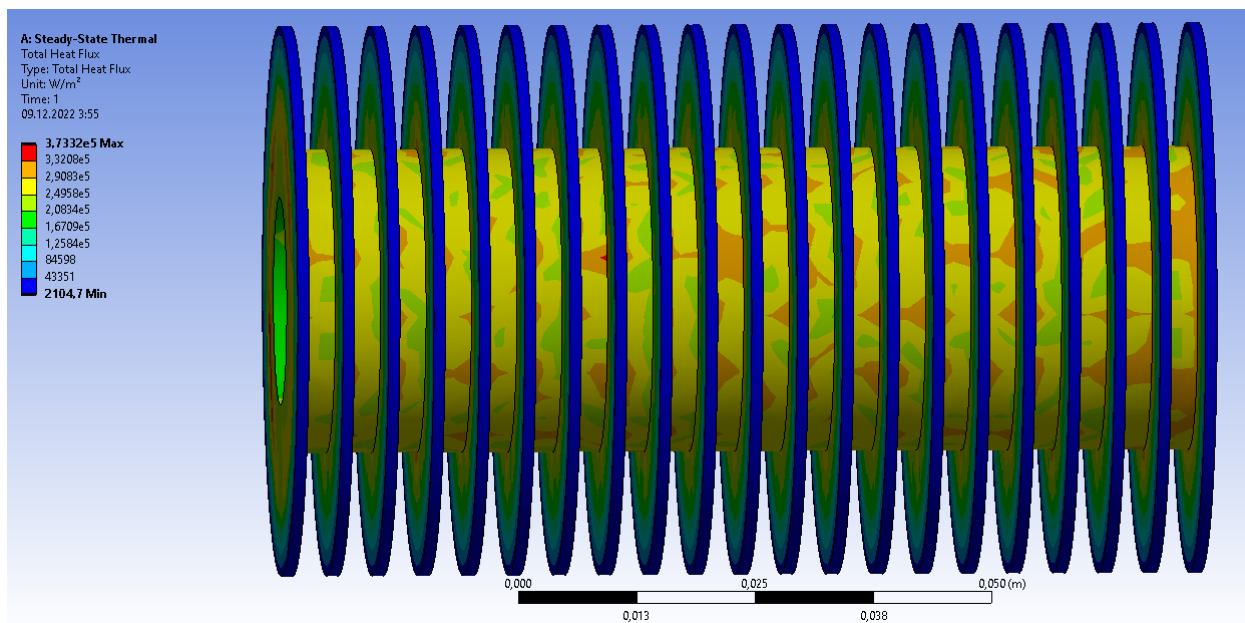


Рисунок 3 – Тепловой поток с поверхности теплообмена

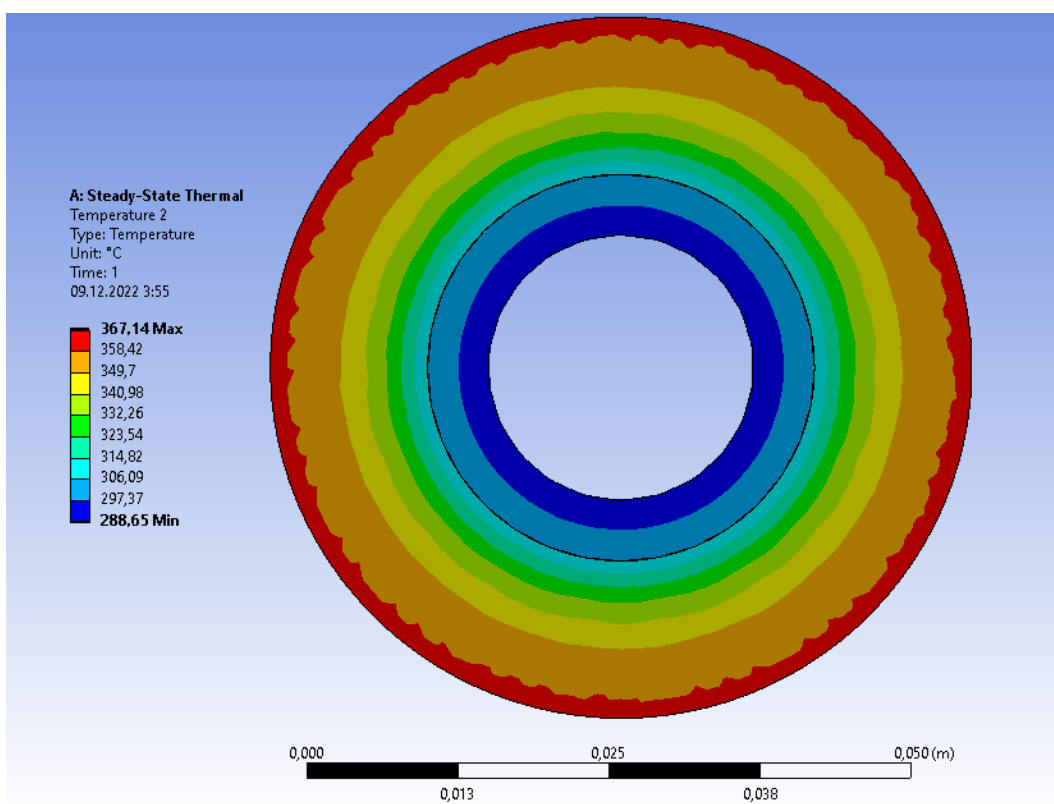


Рисунок 4 – Поле температур (в поперечном разрезе ребра и трубы)

По результатам численного моделирования средний тепловой поток на внешней поверхности трубы составляет 156580 Вт/м<sup>2</sup>, что в переводе на удельные потери с одного

метра трубы составляет 10606,38 Вт/м. Относительная погрешность с теоретическим расчетом составляет:

$$\Delta = \frac{10127,22 - 10606,38}{10127,22} \cdot 100\% = 4,73\%$$

### Обсуждение

Проведенное исследование с удовлетворительной точностью 4,73% позволяет описать теплофизическую картину распределения температур и теплового потока на поверхности теплообмена и в пределах ребер. Метод может быть использован при проектировании в холодильных установках, в частности в испарительных, в оребренных поверхностях радиаторов, в экономайзерах с оребренными трубами.

### Заключение

Использование метода МКЭ экономично относительно вычислительных ресурсов при решении задач на стационарный теплообмен с оребренной поверхности и позволяет с удовлетворительной для инженерной практики точностью описывать тепловой поток и температурное поле в пределах твердотельной зоны.

### Список литературы:

1. Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 N 1523-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года» Цветков Ф.Ф. Тепломассообмен: учебник для вузов / Ф.Ф. Цветков, Б.А. Григорьев. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 562., ил.
2. Цветков Ф.Ф. Тепломассообмен: учебник для вузов / Ф.Ф. Цветков, Б.А. Григорьев. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 562., ил.
3. Картанова, А. Д. Компьютерное моделирование двухфазного течения смеси газа и твердых частиц в канале переменного сечения / А. Д. Картанова, С. М. Сулайманова, А. Б. Абдрасакова // Проблемы автоматизации и управления. – 2021. – № 2(41). – С. 18-25.
4. Этапы конечно-элементного моделирования течения жидкости в трубопроводе в ANSYS Fluent / В. С. Присяжная, И. С. Демьшев, Д. С. Бугорский [и др.] // Актуальные проблемы современной науки и образования: Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции аспирантов и молодых ученых, Димитровград, 18 февраля 2021 года / Под редакцией Г.М. Ильмушкина. – Димитровград: Димитровградский инженерно-технологический институт - филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Национальный исследовательский университет "МИФИ", 2021. – С. 101-104.
5. Кужабаев, Е. С. Моделирование течения воздуха во впускном ресивере в программном комплексе ANSYS Fluent / Е. С. Кужабаев, С. П. Чирский // Ростовский научный журнал. – 2018. – № 4. – С. 112-124.
6. Верификация программного комплекса ANSYS Fluent для численного моделирования газодинамических процессов в воздухозаборных устройствах / В. В. Морозов, П. Д. Шилин, А. А. Равина, С. А. Шалынков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 9. – С. 385-388.

7. Долинин, Д. А. Моделирование систем теплоснабжения с помощью программного модуля ANSYS FLUENT / Д. А. Долинин, Н. В. Кувшинов // "Энергия-2015". Десятая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных: Сборник конкурсных докладов, Иваново, 21–23 апреля 2015 года. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2015. – С. 44-47.

#### References:

1. Decree of the Government of the Russian Federation of June 9, 2020 N 1523-r "On approval of the Energy Strategy of the Russian Federation for the period up to 2035" Tsvetkov F.F. Heat and mass transfer: a textbook for universities / F.F. Tsvetkov, B.A. Grigoriev. - M.: MPEI Publishing House, 2011. - 562., ill.
2. Tsvetkov F.F. Heat and mass transfer: a textbook for universities / F.F. Tsvetkov, B.A. Grigoriev. - M.: MPEI Publishing House, 2011. - 562., ill.
3. Kartanova, A.D., Sulaimanova, S.M., Abdrasakova, A.B. Computer simulation of two-phase flow of a mixture of gas and solid particles in a channel of variable cross section // Problems of Automation and Control. - 2021. - No. 2 (41). - S. 18-25.
4. Stages of finite element modeling of fluid flow in a pipeline in ANSYS Fluent / V. S. Prisyazhnaya, I. S. Demyshev, D. S. Bugorsky [et al.] // Actual problems of modern science and education: Collection of scientific papers of the All-Russian scientific-practical conference of graduate students and young scientists, Dimitrovgrad, February 18, 2021 / Edited by G.M. Ilmushkin. - Dimitrovgrad: Dimitrovgrad Institute of Engineering and Technology - branch of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "National Research University "MEPhI", 2021. - P. 101-104.
5. Kuzhabaev, E. S. Simulation of air flow in the intake receiver in the ANSYS Fluent software package / E. S. Kuzhabaev, S. P. Chirsky // Rostov Scientific Journal. - 2018. - No. 4. - P. 112-124.
6. Morozov V. V., Shilin P. D., Ravina A. A., Shalynkov S. A. Verification of the ANSYS Fluent software package for numerical simulation of gas-dynamic processes in air intakes // Bulletin of the Tula State University. Technical science. - 2021. - No. 9. - P. 385-388.
7. Dolinin, D. A. Modeling of heat supply systems using the ANSYS FLUENT software module / D. A. Dolinin, N. V. Kuvshinov // "Energy-2015". Tenth international scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists: Collection of competitive reports, Ivanovo, April 21–23, 2015. - Ivanovo: Ivanovo State Energy University named after. IN AND. Lenin, 2015. - S. 44-47.