

УДК 536.2

---

**ПРИМЕНЕНИЕ LES-МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИ РЕШЕНИИ  
ЗАДАЧИ ТЕПЛОПЕРЕНОСА СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИЕЙ МЕТОДОМ  
КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ****Осинцев Константин Владимирович,**  
заведующий кафедрой ПТЭ,**Воронина Мария Васильевна,**  
студент,**Олиниченко Алёна Юрьевна,**  
студент,**Зими́на Ю́лия Константи́новна,**  
студент,**Ки́лин Анто́н Серге́евич,**  
студентЮжно-Уральский государственный университет, г. Челябинск  
454080, РФ, г. Челябинск пр. Ленина, 76 E-mail: pte2017pte@mail.ru**Аннотация**

---

Целью статьи является исследование переноса тепла при естественной конвекции в ламинарных и турбулентных приближениях. Для этого была построена математическая модель переноса тепла, с использованием модели турбулентности LES программного пакета ANSYS Fluent.

---

**Ключевые слова:** естественная конвекция, теплоперенос, численное моделирование, модели турбулентности.

---

**APPLICATION OF LES-MODELS OF TURBULENCE IN SOLVING THE  
PROBLEM OF HEAT TRANSFER BY FREE CONVECTION USING FINITE  
ELEMENT METHOD****Konstantin V. Osintsev,**  
Head of the Heat and power engineering department,**Maria V. Voronina,**  
student,

**Alyona Y. Olinichenko,**  
student,

**Yulia K. Zimina,**  
student,

**Anton S. Kilin,**  
student

South Ural State University, Chelyabinsk 454080, Russian Federation, Chelyabinsk ave. Lenin, 76  
E-mail: pte2017pte@mail.ru

---

## ABSTRACT

---

The aim of the article is to study the heat transfer during natural convection in laminar and turbulent approximations. For this, a mathematical model of heat transfer was built using the LES turbulence model of the ANSYS Fluent software package.

---

**Keywords:** natural convection, heat transfer, numerical simulation, turbulence models.

---

### **Введение**

Актуальность задач по естественной конвекции объясняется необходимостью ежегодно повышать энергетическую эффективность различных технических систем и устройств, например таких как, систем хранения и транспорта нефтепродуктов.

Исследовательская работа в сфере естественной конвекции позволяет диагностировать работу систем, которые включают в себя элементы, выделяющие тепло. Исследования позволяют составить прогноз временных рамок, в которую техника может прийти в эксплуатационную непригодность. Создание имитационной модели процесса переноса тепла позволяет вычислить оптимизированные показатели режима течения, подобрать эффективные производственные средства теплоотвода в охлаждающих системах. Теплоотвод можно производить при подвижном хладагенте. В данном случае отвод тепла производится в режиме вынужденной или смешанной конвекции.

В настоящее время имеется масса научных исследовательских работ в сфере естественной конвекции [1]. Произведены анализы ламинарного течения экспериментальным и численным типом. Это связано с воздействием гравитационной силы на жидкость, вследствие неоднородности температурных показателей. Процесс конвективного теплообмена происходит в ограниченном пространстве параллелепипеда с теплопроводными стенками, при использовании местного источника питания.

Терехов В.И. и Шермет М.А. в своих работах [2, 3] на примере эксперимента и теоретических знаний изучили закономерные характеристики естественной конвекции, смоделировали модели простого типа. Имитационные модели не включают в расчет воздействие, оказанное теплопроводными ограждающими конструкциями. Они передают значения переноса тепла при ограниченном подводе энергии. Источник подогрева имеет малый размер по сравнению с размерами области, в которой осуществляется изменение температурных полей.

Проводимые ранее исследования не позволяют полно описать механизм образования и распространения конвективных вихрей около электрических нагревателей. Данное явление распространено при нагреве разного рода жидкостей в РГСН (резервуарах горизонтальных), а также при прогреве воздуха системами отопления (с помощью вихревого тепло генератора или Воздухонагревателей ВТР) и нагревании технологического продукта в пищевой и химической промышленности, например нагрев нефти фланцевыми тэнами в резервуарах перед обработкой (что необходимо для управления потоком нефти, а также позволяет полностью обеспечить контроль температуры.). Среда приводится в движение вследствие разности плотностей, которая в свою очередь связана с разностью температур (между поверхностью нагревателя и жидкостью).

Из-за недостатка количества исследований по теме делать выводы невозможно, поэтому целью настоящей работы является обзор моделей турбулентности, используемых при решении задачи теплопереноса при свободной конвекции методом конечных элементов.

Наиболее точный метод решения задач нахождения экстремумов функций минимумов и максимумов – это метод конечных элементов. Главным вопросом данной задачи является нахождение показателей функций. Это задается выбором соответствующих аргументов функции.

Метод конечных элементов применим для решения вариационных задач с различными геометрическими фигурами. Задачи, решенные с помощью аналитики, имеют примитивную геометрию.

Данный метод заключается в разделении области различных форм на конечные элементы. Посредством этого производится расчет полей напряжений и вариантов деформации производственных деталей, учитывая особенности их конструкции.

Метод конечных элементов подразумевает под собой решение задач любой сложности путем присвоения индивидуальных базисных функций для каждой области разбиения. Расчет зависит от выбранного пользователем метода построения сетки КЭ. Данный метод имеет недостаток в виде точности конечных результатов.

Моделирование в программе Ansys позволяет применять численный метод свободно конвективных течений. Он основан на моделях турбулентной вязкости алгебраического и дифференциального типа.

Г. В. Кузнецов, В. И. Максимов, М. А. Шермет в своей работе предоставили физический эксперимент и моделирование численным методом в программе ANSYS Fluent.

Математическая модель включает в себя процедуру теплопереноса в выделенной области. Используется система непостоянных уравнений пространства. Данный процесс передачи тепла за счет обтекания теплоносителя происходит в пневмотораксе. Применяется уравнение Буссинеска и уравнение Лапласа. Замыкающей моделью турбулентности является стандартная модель и реализуемая модель типа k-epsilon.

### **Материалы и методы**

Исходные данные к расчету приведены ниже.

Геометрические размеры резервуара:  $a = 81$  см,  $b = 42$  см,  $c = 36$  см. Геометрические размеры нагревателя: диаметр 5 см, длина 15 см. Температура жидкости в резервуаре  $24$  °С, удельная тепловая мощность нагревателя  $22956$  Вт/м<sup>2</sup>. Резервуар заполнен водой. Схематично модель изображена на рисунке 1.

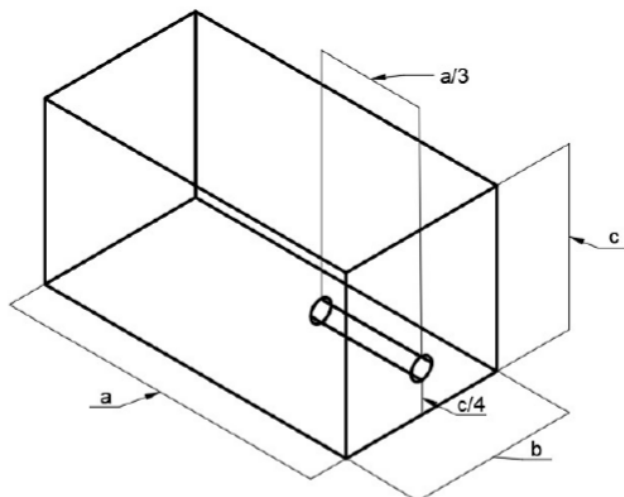


Рисунок 1 – Схема пространства модели

Теоретический расчет температуры стенки нагревателя выполнен по критериальным уравнениям подобия свободно конвективного теплопереноса методом последовательных приближений.

Рассчитаем число Рэлея по следующей формуле:

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot d^3 \cdot \Delta t \cdot Pr}{\nu^2}$$

Здесь  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\beta$  – коэффициент объемного расширения, 1/К;

$d$  – диаметр нагревателя, м;

$\Delta t$  – разность температур, °С;

$Pr$  – число Прандтля;

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с.

Все теплофизические свойства уточняются с каждым приближением при расчете по методу из справочных данных [4].

Уравнение подобия при заданном числе Рэлея имеет вид [5]:

$$Nu = 0,125 \cdot Ra^{0,33}$$

Коэффициент теплопередачи составит:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d}$$

Температура стенки по уравнению Ньютона-Рихмана:

$$t_c = t_{жс} + \frac{Q}{\alpha \cdot \pi \cdot d \cdot L}$$

В результате расчетов получим коэффициент теплоотдачи равный 844,6 Вт/ (м<sup>2</sup> · °С) и температуру стенки нагревателя равной 77,18 °С.

По полученным расчетным и исходным данным строится геометрическая модель и сетка с количеством элементов 1043013, узлов 183438.

В данном исследовании используется модель турбулентности LES, решающая задачи о крупных вихрях, представляющую собой блок уравнений движения потока. В этом подходе вихревые структуры разрешаются более детально, однако и затраты у этого метода выше (требуется большее число контрольных объемов и меньший шаг по времени). Данная модель наиболее пригодна для исследований подобного рода так как для турбулентных течений характерны вихри с широким диапазоном параметров длины и масштаба времени.

### Результаты

В результате численного моделирования теплофизического процесса конвективного переноса тепла были получено температурное поле в резервуаре (рис.2).

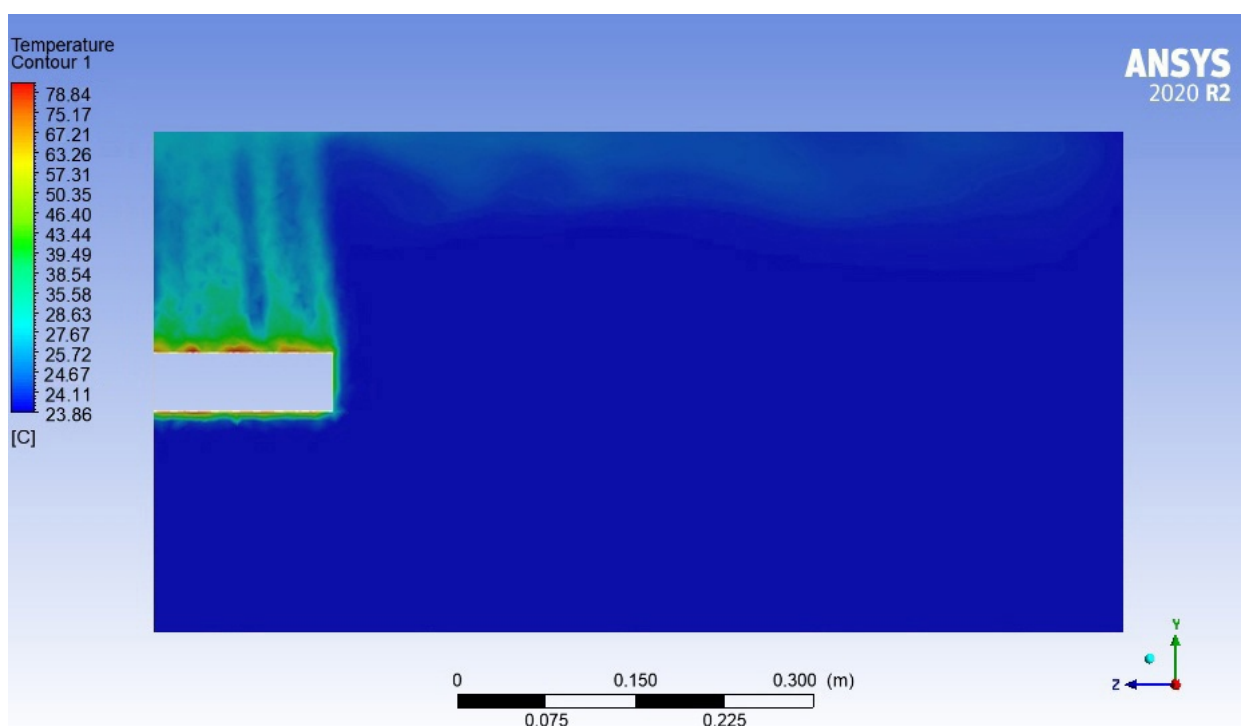


Рисунок 2 – Температурное поле в резервуаре с нагревателем

Сравнивая результаты теоретического расчета и численного моделирования, можно заключить о погрешности описания температурного поля с точностью до:

$$\Delta = \frac{t_1 - t_2}{t_1} \cdot 100\%$$

$$\Delta = \frac{78,84 - 77,18}{78,84} \cdot 100\% = 2\%$$

### Обсуждение

Проведённое исследование доказывает, что при численном расчете модель турбулентности LES с точностью до 2 % позволяет описать температурное поле в резервуаре сравнительно небольшого размера при наличии в нем одного цилиндрического источника

теплоты. Результат исследования может быть полезным при проектировании подогреваемых емкостей для хранения жидкостей, например баков-аккумуляторов, систем хранения и транспорта технических масел.

#### **Заключение**

Предложенная модель турбулентности LES с удовлетворительной точностью позволяет описать процесс естественно-конвективного переноса тепла с цилиндрического нагревателя при расчете температурного поля методом конечных элементов в программном пакете ANSYS Fluent.

#### **Список литературы:**

1. Кузнецов, Г. В. Естественная конвекция в замкнутом параллелепипеде при наличии локального источника энергии / Г. В. Кузнецов, В. И. Максимов, М. А. Шеремет // Прикладная механика и техническая физика. – 2013. – Т. 54. – № 4(320). – С. 86-95
2. Терехов В. И., Экаид А. Л. Трехмерная ламинарная конвекция внутри параллелепипеда с нагревом боковых стенок // Теплофизика высоких температур. 2011. Т. 49, № 6. С. 905–911.
3. Шеремет М. А. Пространственные режимы сопряженной естественной конвекции в замкнутом кубе // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2012. № 1. С. 119–126.
4. Бабук, В. А. Сборник задач по теплопередаче: учебное пособие / В. А. Бабук, А. Ф. Леонов, Г. В. Родионов. – 3-е перераб. и доп. – Санкт-Петербург: БГТУ "Военмех" им. Д.Ф. Устинова, 2018. – 68 с.
5. Цветков Ф.Ф. Тепломассообмен: учебник для вузов / Ф.Ф. Цветков

#### **References:**

1. Kuznetsov, G. V. Natural convection in a closed parallelepiped in the presence of a local energy source / G. V. Kuznetsov, V. I. Maksimov, M. A. Sheremet // Applied Mechanics and Technical Physics. - 2013. - T. 54. - No. 4 (320). - pp. 86-95
2. V. I. Terekhov and A. L. Ekaid, "Three-dimensional laminar convection inside a parallelepiped with heating of the side walls," Thermophysics of High Temperatures. 2011. V. 49, No. 6. S. 905–911.
3. Sheremet, M.A., Spatial Regimes of Conjugate Natural Convection in a Closed Cube, Vestn. Volume. state university Mathematics and mechanics. 2012. No. 1. P. 119–126.
4. Babuk, V. A. Collection of problems on heat transfer: textbook / V. A. Babuk, A. F. Leonov, G. V. Rodionov. - 3rd revision. and additional - St. Petersburg: BSTU "Voenmekh" them. D.F. Ustinova, 2018. - 68 p.
5. Tsvetkov F.F. Heat and mass transfer: a textbook for universities / F.F. Tsvetkov