УДК 004.942, 519.876.5, 536.24
DOI 10.22213/2413-1172-2018-4-208-216

# РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ В РЕАКЦИОННОЙ КАМЕРЕ ПИРОЛИЗНОГО РЕГЕНЕРАТОРА

**В. А. Глушков**, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия
**В. Г. Гравшин**, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*Рассматривается подход к моделированию динамики распространения тепла по объему гомогенного материала внутри реакционной камеры пиролизного регенератора при наличии нагревателей, размещаемых внутри камеры. Проанализированы несколько подходов для расчета температурных полей: аналитический (непосредственное решение дифференциального уравнения Фурье в частных производных), численный (метод конечных разностей и метод конечных элементов), применение эквивалентных электрических схем и компьютерное моделирование. Показано, что данная динамика описывается дифференциальными уравнениями дробного порядка. При этом форма уравнений, описывающих зависимости токов в ветвях электрической цепи и напряжения в ее узлах, аналогична форме уравнений, описывающих зависимость теплового потока в среде и значений температуры в отдельных ее точках. Таким образом, решение дифференциального уравнения заменяется на моделирование работы электрической цепи во временнóй области. Предложены схемотехнические модели теплопроводности среды для таких элементов пространства, как стержень, а на его основе – элемент плоскости, столбец и объем. С помощью данных элементов проведено моделирование нестационарного распространения температуры по объему среды при наличии от одного до трех нагревательных элементов внутри объема. Корректность схемотехнического моделирования подтверждена с помощью специализированного ПО, реализующего классический метод конечных элементов.*

**Ключевые слова:** нестационарная теплопередача, пиролизная регенерация, длинная *RC*-линия, дифференциальное уравнение дробного порядка, метод конечных элементов, схемотехническое моделирование.

## Введение

На сегодняшний день актуальной проблемой является истощение топливных ресурсов. В связи с этим одними из важнейших направлений научно-технического прогресса остается получение и использование альтернативных источников топлива, в частности такого возобновляемого сырья, как биомасса растительного и животного происхождения. Одним из эффективных технологических направлений получения моторного топлива из биомассы является процесс ее пиролиза. Модификацией данного процесса является пиролизная регенерация, принцип и соответствующее устройство для которой описаны в работах [1, 2]. Целесообразность применения данного процесса определяется в числе прочего соотношением энергетических затрат на него и полезного энергетического выхода. Очевидно, что первое соотношение необходимо уменьшать, а второе – увеличивать. Для снижения энергетических затрат на процесс нужен анализ динамики распространения температуры внутри реакционной зоны от нагревательных элементов по перерабатываемому сырью.

## Подходы к решению задачи анализа температурного поля в замкнутом пространстве

Для расчета температурных полей применяются следующие основные подходы:

– аналитический;
– численный;
– эквивалентные схемы;
– компьютерное моделирование.

*Аналитический подход* дает возможность получить решение задачи в виде математического выражения для температуры как функции пространственных координат и времени. Решение должно удовлетворять определенному дифференциальному уравнению, из которого оно получено, и определенным начальным и граничным условиям, налагаемым конкретным процессом. Однако при этом почти во всех случаях приходится математически упрощать рассматриваемый процесс, чтобы этот метод мог дать желаемые результаты.

Дифференциальное уравнение теплопроводности, известное как закон Фурье, при отсутствии внутренних источников теплоты имеет вид

$$\frac{dt}{d\tau} = \alpha\left(\frac{d^2t}{dx^2} + \frac{d^2t}{dy^2} + \frac{d^2t}{dx^2}\right). \quad (1)$$

Выражение (1) является математическим выражением температурного поля.

Условия однозначности задаются в виде физических параметров $\lambda$, $c$, $\rho$; формы и геометрических размеров объекта $l_0$, $l_1$, $l_2$, …, $l_n$; температуры тела в начальный момент времени $\tau = 0$.

Решить задачу теплопроводности – значит установить зависимость между температурой $t$, временем $\tau$ и координатами тела $x$, $y$, $z$.

Наряду с высокой точностью модели в силу решения, получаемого аналитически, данный подход имеет очевидный недостаток – повышение сложности уравнения (1) и процесса его решения при сложной форме анализируемого пространства, наличии одного или нескольких источников тепла и распространенном характере распределения параметров теплопроводности среды [3–5]. Тем не менее аналитический подход часто применяется при рассмотрении пространства, заданного в простой геометрической форме, например, в виде цилиндра [6].

При применении *численных методов* решения уравнения (1) процедура решения становится проще, поскольку она основывается на методах приближенного интегрирования дифференциальных уравнений. При решении задач технологической теплофизики применяются:

– метод конечных разностей (МКР);

– метод конечных элементов (МКЭ).

Не углубляясь в технику вычислений и методику их осуществления на ЭВМ, рассмотрим принципиальные особенности каждого из методов.

Метод конечных разностей основан на замене истинных значений производных приближенными значениями в некоторых точках, называемых узлами. Узлы являются центрами элементов конечной длины, на которые разбивается твердое тело, участвующее в теплообмене. Вместо производных в дифференциальном уравнении используются их конечноразностные аппроксимации. При построении дискретных аппроксимаций краевых дифференциальных задач увязываются две, возможно, противоречивые цели: хорошее качество аппроксимации и эффективное устойчивое решение получающихся при этом алгебраических систем.

При использовании МКР для задач теплопроводности твердое тело представляют в виде совокупности узлов. Аппроксимируя частные производные дифференциального уравнения конечными разностями, получают систему линейных алгебраических уравнений для определения температуры как локальной характеристики в каждом узле сетки. Полученная система является незамкнутой; для ее замыкания используют разностное представление граничных условий. В результате получают замкнутую систему линейных алгебраических уравнений, которую решают численными методами с помощью ЭВМ [7]. Пример решения подобной задачи с помощью МКР приведен в статье [8].

Метод конечных элементов подразумевает разбиение твердых тел на одинаковые по размеру элементарные объемы, а времени – на одинаковые промежутки, как это делается в методе конечных разностей. Последний вызывает для более или менее сложных случаев теплообмена в технологических системах столь большой объем вычислительной работы, что процесс счета оказывается очень длительным и дорогостоящим, подчас с ним не справляются даже мощные ЭВМ. Желание существенно уменьшить объем вычислений привело к разработке МКЭ. Этот метод позволяет осуществлять различную детализацию решения в разных областях изучаемого объекта, причем могут быть использованы элементарные объемы, различные не только по величине, но и по конфигурации.

Метод конечных элементов заменяет задачу отыскания функции на задачу отыскания конечного числа ее приближенных значений в отдельных точках-узлах. При этом если исходная задача относительно функции состоит из дифференциального уравнения с соответствующими граничными условиями, то задача метода конечных элементов относительно ее значений в узлах представляет собой систему алгебраических уравнений. С уменьшением максимального размера элементов увеличивается число узлов и неизвестных узловых параметров. Вместе с этим повышается возможность более точно удовлетворить уравнениям задачи и тем самым приблизиться к искомому решению. Отличие метода конечных элементов от конечно-разностного метода Эйлера заключается в том, что в выбранном конечном элементе функция не обязательно заменяется линейной зависимостью, а может быть принята в виде полинома [9].Это повышает точность МКЭ.

*Эквивалентные схемы* предполагают аналогию между процессами теплопроводности и электропроводности. Протекание тока в проводнике входит в группу физических процессов под общим названием «процессы энергомассопереноса». В эту группу входят также процессы теплопроводности, диффузии и подобные им.

Общим для них является то, что поток некоторой субстанции (ток, теплота) под действием разности значений некоторой величины (потенциала, температуры) распространяется через среду, оказывающую сопротивление этому потоку [10].

Уравнения теплопроводности и диффузии аналогичны уравнениям электропроводности (вместо закона Ома в их основе лежат аналогичные законы Фурье и Фика). При этом решение зависит не только от граничных условий, но также от начального состояния и времени [11]. При анализе эквивалентной электрической схемы можно использовать методологический аппарат теории цепей (законы Ома, Кирхгоффа и т. п.), что упрощает процесс постановки задачи и нахождения ее решения.

*Компьютерное моделирование* по факту является не совсем методом, скорее, реализацией предыдущих методов с применением цифровой электронной вычислительной машины в качестве инструмента. Качество процесса и результата такого моделирования напрямую зависит от качества используемых моделей и задания начальных и граничных условий. Очевидное преимущество заключается в том, что компьютерное моделирование дешевле, безопаснее и быстрее физических экспериментальных исследований, а также в том, что оно позволяет автоматизировать обработку и визуализацию результатов моделирования.

Для реализации компьютерного моделирования процесса теплопереноса применяются как специализированные программные продукты, например, ELCUT [12], FlowVision [13], так и программы общего назначения типа Matlab. В специализированном программном обеспечении, как правило, заложен алгоритм на основе метода конечных элементов. При анализе эквивалентных электрических схем в процессе решения данной задачи целесообразнее применять программы схемотехнического моделирования, например LTspice [14].

Рассмотрим решение задачи анализа теплового поля для нестационарного трехмерного случая при однородности теплофизических свойств среды. Для этого используем два подхода: электрическую схему замещения и моделирование с помощью метода конечных элементов в специализированной программе.

## Разработка схемотехнической модели теплового поля

В [15] описан вывод соответствия модели теплопроводности и электропроводности. Если рассмотреть процесс теплопередачи, точнее, температуропередачи в полубесконечном стержне (температура контролируется в начале стержня, а также в его точках на равных расстояниях), то соответствующая схемотехническая модель на основе $RC$-элементов с сосредоточенными параметрами будет иметь вид, как на рис. 1. Напряжение в каждом узле $RC$-линии представляет собой температуру в процессе теплопередачи, а ток, соответственно, представляет собой тепловой поток.

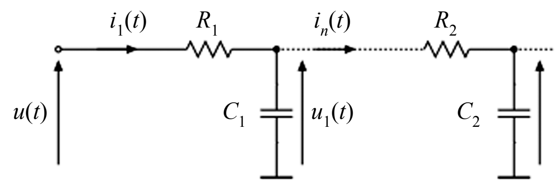


*Рис. 1.* Схемотехническая модель диффузионного процесса. Одномерный случай

На основе данной модели легко получается уравнение диффузии. Напряжение $u(x, t)$ между двумя каскадами представляет собой напряжение на резисторе $R$ (см. формулу (2)) и пропорционально току $i(x, t)$ в этом каскаде:

$$u(x,t)-u(x+dx,t)=Ri(x,t). \qquad (2)$$

Поскольку $dx$ – величина достаточно малая, то (2) можно записать в виде

$$\frac{\partial}{\partial x}u(x,t)=Ri(x,t). \qquad (3)$$

Аналогично, напряжение $u(x, t)$ на конденсаторе $C$ в каждом каскаде может быть описано в виде уравнений

$$i(x,t)-i(x+dx,t)=C\frac{\partial}{\partial t}u(x,t); \qquad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}i(x,t)=C\frac{\partial}{\partial t}u(x,t). \qquad (5)$$

После подстановки уравнения (3) в уравнение (5), получим

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}u(x,t)=RC\frac{\partial}{\partial t}u(x,t). \qquad (6)$$

Математическая модель распространения температуры вдоль полубесконечного стержня при условии отсутствия тепловых потерь представлена в виде формулы

$$\frac{1}{a^2}\frac{\partial^2}{\partial x^2}T(x,t)=\frac{\partial}{\partial t}T(x,t). \qquad (7)$$

Здесь $T$ – температура; $x$ – координата вдоль стержня; $t$ – время; $\frac{1}{a^2}$ – температуропроводность материала стержня.

Формы уравнений (6) и (7) одинаковые, что позволяет использовать приведенную схемотехническую модель.

В [11] показано также, что связь между тепловым потоком $H(t, x)$ и температурой $T(t, x)$ в данном полубесконечном стержне описывается дифференциальным уравнением дробного порядка, а именно порядка 0,5. Таким образом, решение данного дифференциального уравнения дробного порядка может быть заменено моделированием электрической схемы, составленной из пассивных радиоэлементов целого порядка (резисторов и конденсаторов).

В этой же работе показана схемотехническая модель распространения тепла в полубесконечном стержне при наличии рассеяния тепла в каждом рассматриваемом узле стержня. Соответствующее дифференциальное уравнение тоже является уравнением дробного порядка:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}T\left(x,t\right)=a^2\frac{\partial}{\partial t}T\left(x,t\right)+ + 2a^3b\frac{\partial^{0,5}}{\partial t^{0,5}}T\left(x,t\right)+a^4b^2T\left(x,t\right), \quad (8)$$

где $a$ определяет температуропроводность материала стержня, а $b$ – это коэффициент рассеяния теплового потока.

На рис. 2 приведена соответствующая схемотехническая модель. Рассеяние тепла в каждом узле моделируется дополнительным резистором $r$, рассеяние тепла через который пропорционально температуре (напряжению) в данном узле.

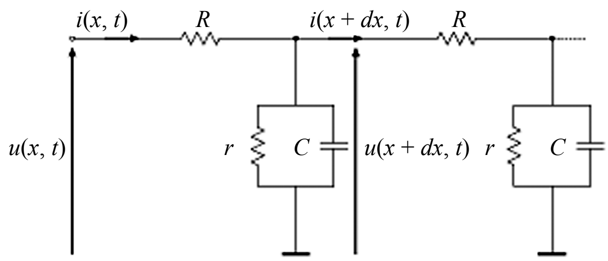


*Рис. 2.* Схемотехническая модель распространения тепла вдоль полубесконечного стержня с учетом тепловых потерь в узлах

Величины $R$, $C$ и $r$ определяют шаг расчетов, то есть их точность. На рис. 3 представлена электрическая схема, состоящая из параллельно соединенных пяти одномерных четырехзвенных $RC$-элементов с сосредоточенными параметрами. Данная схема определяет точность моделирования теплового процесса, то есть задает плоскую элементарную область пространства, определяющую высоту моделируемого геометрического пространства, заполненного биологическим сырьем.

На основе модели на рис. 3. создана электрическая модель столбца (рис. 4), состоящая из четырех плоских элементарных областей.

С помощью подобных столбцов создана модель пространства, в котором и исследуется распространение тепла (рис. 5).

Имеем объем, состоящий из 24 полученных ранее столбцов 1×1×5, в который был введен сначала один нагревательный стержень, потом второй и третий для сравнительного анализа распространения тепла (рис. 6).

Для сравнения полученной модели была создана еще одна модель в профессиональной программе компьютерного моделирования *ELCUT*, предназначенной для моделирования различных полей, в том числе и тепловых. В основу программы заложен метод конечных элементов. Вторая полученная модель показана на рис. 7.

После дальнейшей настройки моделей и задания одинаковых начальных условий было осуществлено сравнение полученных результатов. Для этого были выбраны несколько плоскостей, представляющих сечение реакционной камеры в различных местах и наблюдение за характером распространения тепловых полей моделей (рис. 8–12).

Следующим шагом сравнения моделей было определение значения температур в различных точках тех же самых плоскостей; результаты приведены ниже (рис. 13, таблица).

Из таблицы видно, что отклонения результатов моделирования двумя способами не отличаются более чем на 3,7 %. Характеры распределения тепловых полей двух моделей адекватно отражают процесс тепловой диффузии, свойственной реальным тепловым процессам, и с высокой степенью точности повторяют друг друга, несмотря на то, что визуализация данных, полученных в программе схемотехнического моделирования, обеспечивает построение графиков с палитрой из 7 цветов, а программа *ELCUT* предоставляет графики с использованием 32 цветов.

**Выводы**

Таким образом, схемотехническое моделирование теплового поля с использованием дифференциальных уравнений дробного порядка, аналоговой моделью которых является длинная $RC$-линия, свойства которой в схемотехнике можно воспроизвести при помощи электрической цепи, состоящей из $RC$-элементов с сосредоточенными параметрами, адекватно и достаточно точно имитирует протекание тепловых процессов. Это означает, что данный метод моделирования имеет большой потенциал, что убедительно доказало решение с его помощью нестационарной трехмерной задачи распространения тепловой энергии в объеме гомогенного материала.

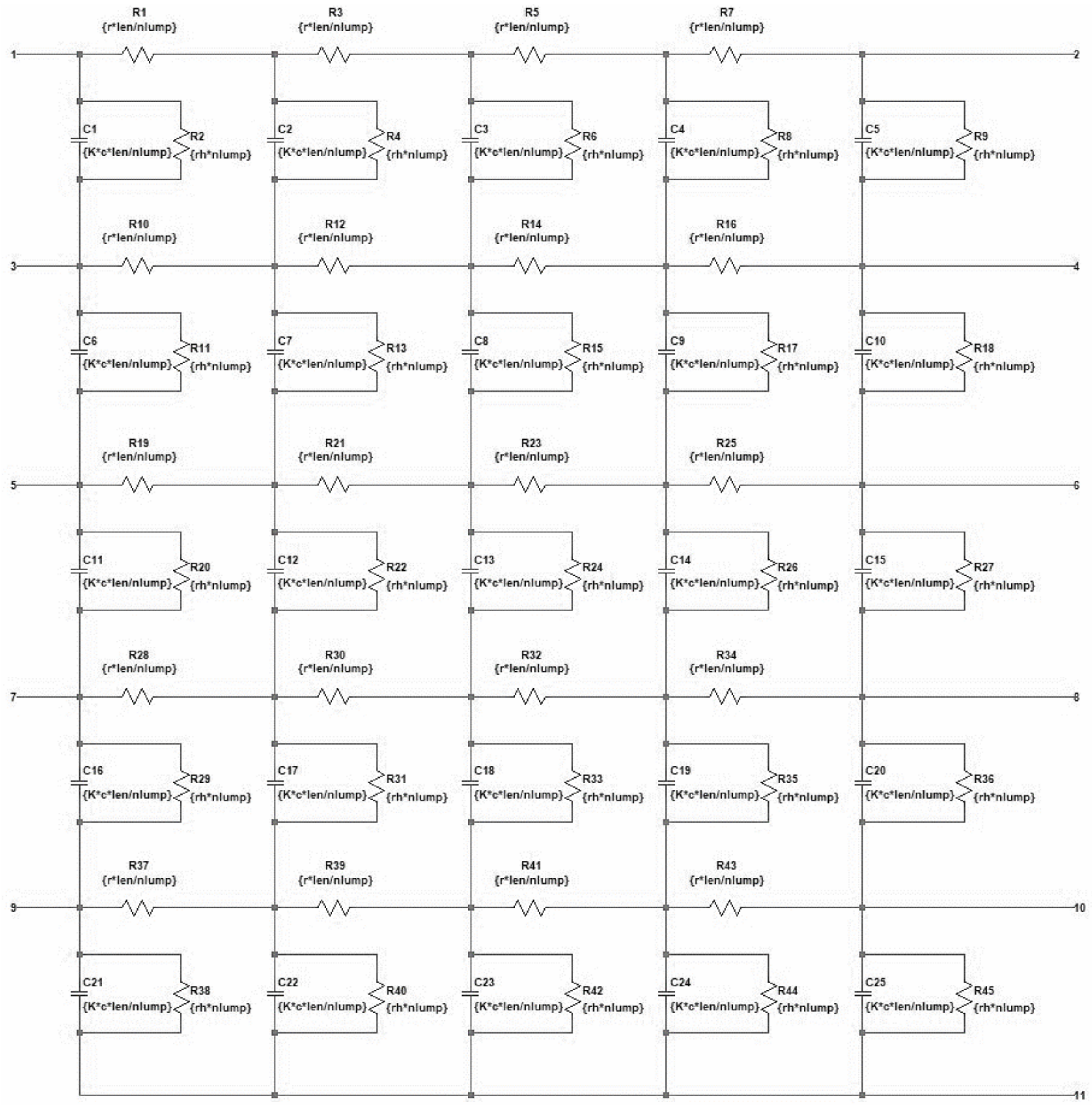


*Рис. 3.* Электрическая схема на основе *RC*-ЭСП, задающая плоскость размером 1×5

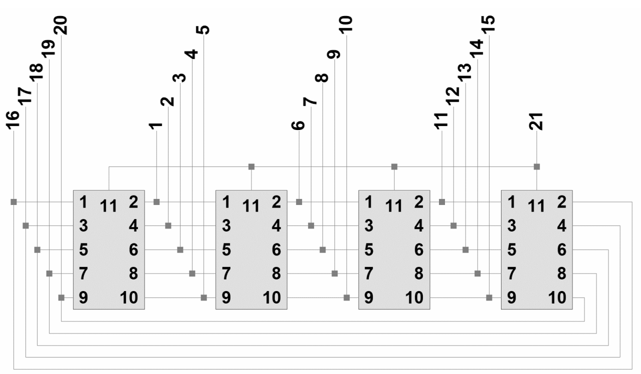


*Рис. 4.* Электрическая модель объемного прямоугольного столбца размером 1×1×5

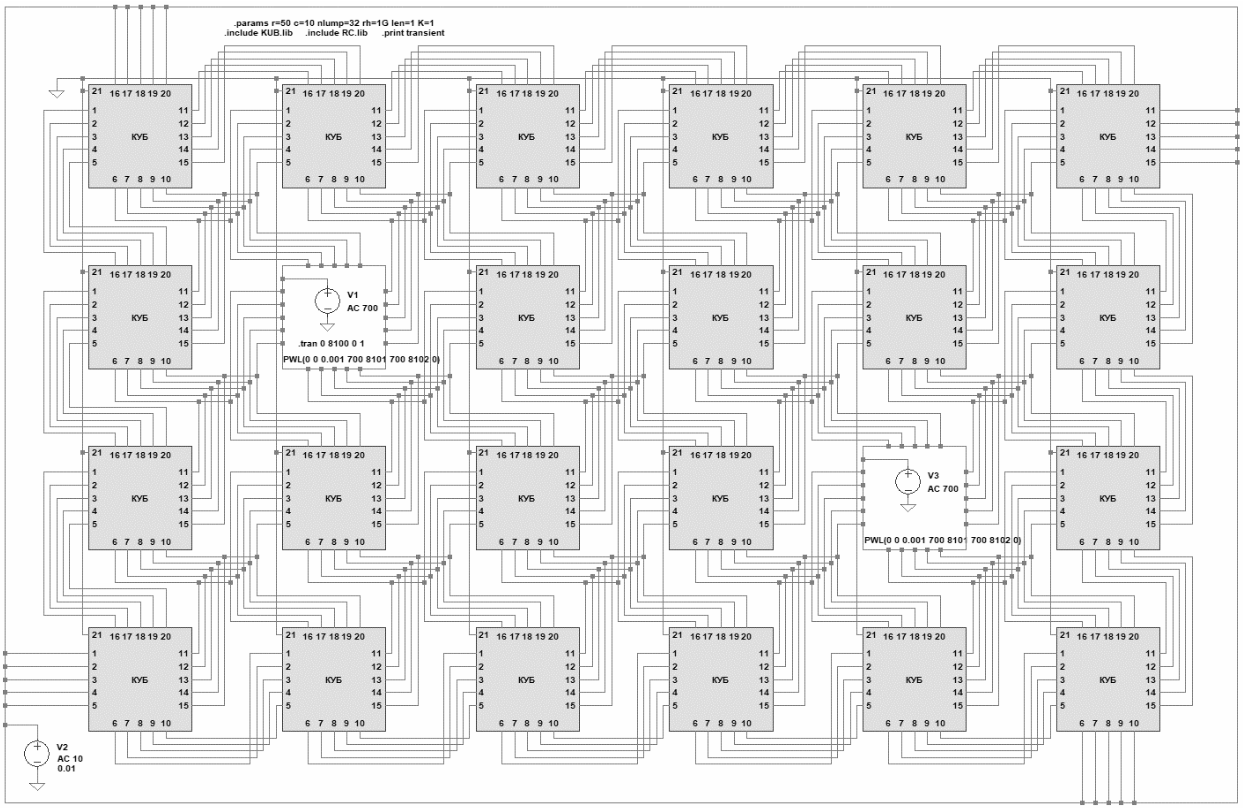


*Рис. 5.* Электрическая модель объема реакционной камеры с двумя нагревательными стержнями

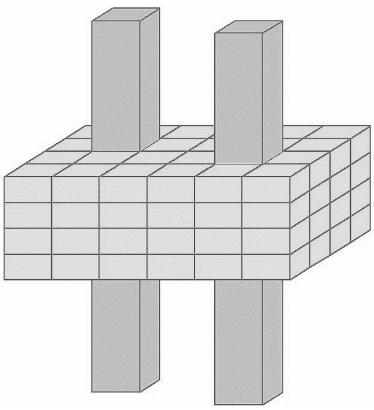

*Рис. 6.* Визуальное представление объекта, моделируемого с помощью электрической схемы, изображенной на рис. 5

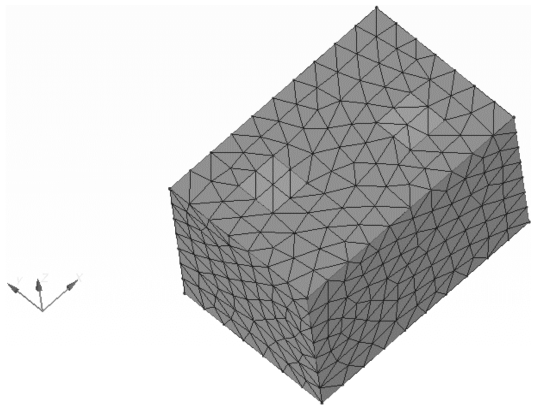

*Рис. 7.* Геометрическая модель объекта моделирования с двумя электродами и сеткой конечных элементов в программе ELCUT

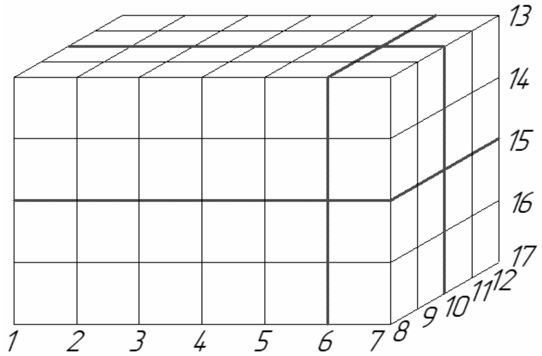


*Рис. 8.* Плоскости, выбранные для сравнения

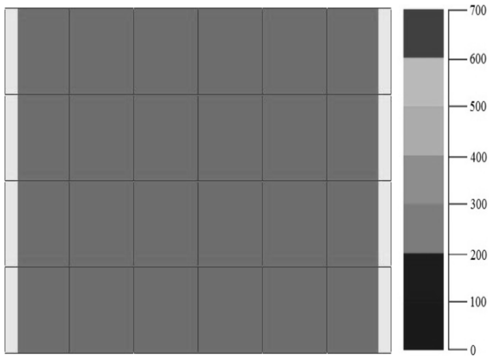


*Рис. 9.* График распределения тепла в схемотехнической модели с двумя нагревательными стержнями в плоскости № 10


*Рис. 10.* График распределения тепла в модели *ELCUT* с двумя нагревательными стержнями в плоскости № 10

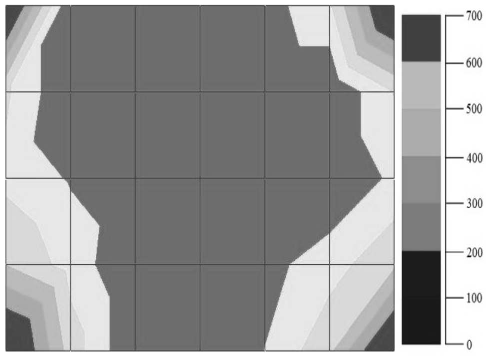


*Рис. 11.* График распределения тепла в схемотехнической модели с тремя нагревательными стержнями в плоскости № 15

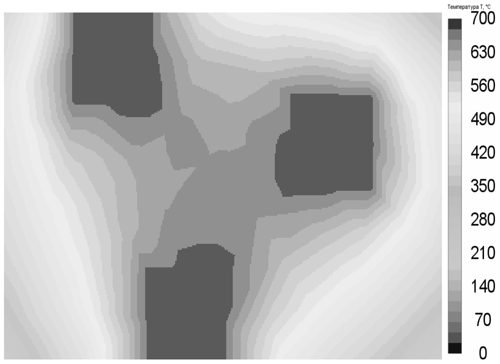


*Рис. 12.* График распределения тепла в модели *ELCUT* с тремя нагревательными стержнями в плоскости № 15

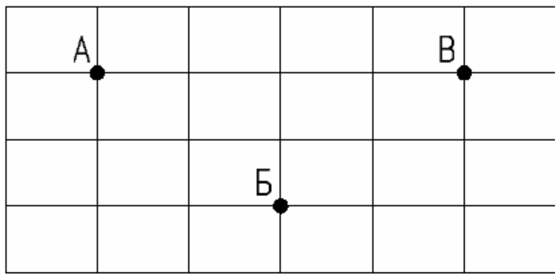


*Рис. 13.* Точки, расположенные на плоскости № 10, в которых сравниваются значения температур моделей

**Значения температур в точках**

| Количество стержней | Точки на плоскости | Схемотехническая модель, *T*, °С | Модель в программе *ELCUT*, *T*, °С |
|---|---|---|---|
| 1 | А | 516 | 498 |
| | Б | 700 | 700 |
| | В | 412 | 398 |
| 2 | А | 700 | 700 |
| | Б | 677 | 668 |
| | В | 700 | 700 |
| 3 | А | 609 | 601 |
| | Б | 692 | 690 |
| | В | 700 | 700 |

### Библиографические ссылки

1. *Глушков В. А.* Анализ проблемы поиска альтернативы нефти и природному газу. М. ; Ижевск : Изд-во НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2007. 200 с.

2. Технологические режимы получения энергоносителей путем переработки биомассы : монография / В. А. Глушков, В. П. Тарануха, А. Ю. Печенкин, И. Г. Русяк. Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2011. 112 с.

3. Задачник по технической термодинамике и теории тепломассообмена : учеб. пособие / В. Н. Афанасьев, С. И. Исаев, И. А. Кожинов и др.] ; под ред. В. И. Крутова и Г. Б. Петражицкого. 2-е изд., стер. СПб. : БХВ-Петербург, 2011. 384 с.

4. Теплотехника : учебник для вузов / В. Н. Луканин, М. Г. Шатров, Г. М. Камфер [и др.] ; под ред. В. Н. Луканина. 6-е изд., стер. М. : Высш. шк., 2008. 671 с.

5. Теоретические основы термодинамики и теплопередачи : учеб. пособие / А. Н. Ларионов [и др.]. Воронеж : Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра Первого, 2015. 200 с. URL: http://www.iprbookshop.ru/72761.html. ISBN 978-5-7267-0836-2.

6. *Перевозчиков С. М.*, *Загребин Л. Д.*, *Артанов А. М.* Определение температуропроводности для образцов в форме цилиндра // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2016. № 2. С. 72–74.

7. *Кузнецов Г. В.*, *Шеремет М. А.* Разностные методы решения задач теплопроводности : учеб. пособие. Томск : Изд-во ТПУ, 2007. 172 с.

8. *Попов Д. Н.*, *Диденко В. Н.*, *Касимов Р. З.* Методика численного моделирования фазовых переходов теплоаккумулирующих материалов, заключенных в двумерный объем // Интеллектуальные системы в производстве. 2015. № 1. С. 26–30.

9. Решение задач теплопроводности методом конечных элементов : учеб. пособие / Н. П. Жуков, Н. Ф. Майникова, С. С. Никулин, О. А. Антонов. Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2014. 80 с.

10. *Дульнев Г. Н.* Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре : учебник для вузов по специальности «Конструирование и производство радиоаппаратуры». М. : Высш. шк., 1984. 247 с.

11. *Sierociuk D.* Diffusion process modeling by using fractional-order models, Appl. Math. Comput. (2014), http://dx.doi.org/10.1016/j.amc.2014.11.028.

12. Решение задач теплопроводности методом конечных элементов.

13. *Шутов В. С.* К расчету температурного поля продуктов сгорания в дымовых трубах теплогенерирующих установок // Интеллектуальные системы в производстве. 2016. № 1. С. 96–99.

14. *Володин В. Я.* LTspice: компьютерное моделирование электронных схем / Санкт-Петербург : Изд-во БХВ-Петербург, 2010. 400 с.

15. *Sierociuk D.* Diffusion process modeling by using fractional-order models, Appl. Math. Comput. 2014. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.amc.2014.11.028.

16. *Sierociuk D.* Diffusion process modeling by using fractional-order models, Appl. Math. Comput. 2014. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.amc.2014.11.028.

## References

1. Glushkov V. A. *Analiz problemy poiska al'ternativy nefti i prirodnomu gazu* [Analysis of the problem of finding alternatives to oil and natural gas]. Moscow - Izhevsk : Reguljarnaja i haoticheskaja dinamika Publ., 2007, 200 p. (in Russ.).

2. Glushkov V. A., Taranuha V. P., Pechenkin A. Ju., Rusjak I. G. *Tehnologicheskie rezhimy poluchenija jenergonositelej putem pererabotki biomassy* [Technological modes of obtaining energy through the processing of biomass]. Izhevsk : IzhGTU Publ., 2011, 112 p. (in Russ.).

3. Afanas'ev V. N., Isaev S. I., Kozhinov I. A. *Zadachnik po tehnicheskoj termodinamike i teorii teplomassoobmena* [The problem book on technical thermodynamics and the theory of heat and mass transfer]. St. Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2011, 384 p. (in Russ.).

4. Lukanin V. N., Shatrov M. G., Kamfer G. M. *Teplotehnika* [Heat engineering]. Moscow, Vysshaja shkola Publ. 2008, 671 p. (in Russ.).

5. Larionov A. N. *Teoreticheskie osnovy termodinamiki i teploperedachi* [Theoretical foundations of thermodynamics and heat transfer]. Voronezh, Voronezhskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet im. imperatora Petra Pervogo Publ., 2015, 200 p. (in Russ.). ISBN 978-5-7267-0836-2.

6. Perevozchikov S. M., Zagrebin L. D., Artanov A. M. [Determination of thermal diffusivity for samples in the form of a cylinder]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2016, no. 2, pp. 72-74 (in Russ.).

7. Kuznecov G. V., Sheremet M. A. *Raznostnye metody reshenija zadach teploprovodnosti* [Difference methods for solving heat conduction problems]. Tomsk, TPU Publ., 2007, 172 p. (in Russ.).

8. Popov D. N., Didenko V. N., Kasimov R. Z. [Methods of numerical simulation of phase transitions of heat-accumulating materials enclosed in a two-dimensional volume]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2015, no. 1, pp. 26-30 (in Russ.).

9. Zhukov N. P., Majnikova N. F., Nikulin S. S., Antonov O. A. *Reshenie zadach teploprovodnosti metodom konechnyh jelementov* [Solving heat conduction problems by the finite element method: studies. manual]. Tambov, TGTU Publ., 2014, 80 p. (in Russ.).

10. Dul'nev G. N. *Teplo- i massoobmen v radiojelektronnoj apparature* [Heat and mass transfer in electronic equipment]. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 1984, 247 p. (in Russ.).

11. Sierociuk D. Diffusion process modeling by using fractional-order models, Appl. Math. Comput. 2014. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.amc.2014.11.028.

12. Zhukov N. P., Majnikova N. F., Nikulin S. S., Antonov O. A. *Reshenie zadach teploprovodnosti metodom konechnyh jelementov* [Solving heat conduction problems by the finite element method: studies. manual]. Tambov, TGTU Publ., 2014, 80 p. (in Russ.).

13. Shutov V. S. [To the calculation of the temperature field of combustion products in chimneys of heat-generating plants]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2016, no. 1, pp. 96-99 (in Russ.).

14. Volodin V. Ja. *LTspice: komp'juternoe modelirovanie jelektronnyh shem* [LTspice: computer simulation of electronic circuits]. St. Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2010, 400 p. (in Russ.).

15. Sierociuk D. Diffusion process modeling by using fractional-order models, Appl. Math. Comput. 2014. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.amc.2014.11.028.

16. Sierociuk D. Diffusion process modeling by using fractional-order models, Appl. Math. Comput. 2014. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.amc.2014.11.028.

**Developing and Studying a Model of Thermal Field within the Pyrolysis Regenerator Reaction Chamber**

*V. A. Glushkov*, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia
*V. G. Gravshin*, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*The paper considers an approach to model the dynamics of heat propagation through homogeneous material within the pyrolysis regenerator reaction chamber with due account for the heaters located inside the chamber. The following ways to estimate thermal fields are considered: analytical solution (direct solution of Fourier partial differential equation), numerical solution (finite difference method, finite elements method), using equivalent circuits, computer simulation. It is shown that this dynamics is described by fractional-order differential equations. The form of the equations that specify the dependencies between the currents through the branches of the electrical circuit and the voltages at its nodes is just like the form of the equations that set the relations between the heat flux through a media and the temperatures of its certain points. Hence, the solution of the differential equation is replaced by simulation of time-domain operation of the electric circuit. Thermal conductivity schematic models are proposed for such space elements as the rod and the corresponding plane element, the column and the spatial region. These elements are used to simulate non-steady heat transfer through the medium. The schematic modeling validity is proved by means of special software performing classical finite element method.*

**Keywords:** non-steady heat transfer, pyrolysis regeneration, long RC line, fractional-order differential equation, finite elements method, schematic modeling.

Получено 12.11.2018