На правах рукописи



Колотилкина Ксения Владимировна

РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННО–АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В РЕАКТОРАХ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ МЕТАНА

Специальность: 1.2.2. Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Самара 2026

Работа выполнена на кафедре «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет», г. Самара.

Научный руководитель:	**Стефанюк Екатерина Васильевна** доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Трубопроводный транспорт» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара
Официальные оппоненты:	**Вельмисов Петр Александрович** доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Высшая математика» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», г. Ульяновск
	Трубаев Павел Алексеевич доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Энергетика теплотехнологий» ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», г. Белгород
Ведущая организация:	ФГАОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва

Защита состоится «3» февраля 2027 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.2.377.02 при ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус, ауд. 200.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять по адресу: 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус, ФГБОУ ВО «СамГТУ», ученому секретарю диссертационного совета 24.2.377.02. Тел. (846) 337–04–43, e-mail: d24237702@samgtu.ru. В отзыве просим указывать почтовый адрес, номер телефона, электронную почту, наименование организации, должность, шифр и наименование научной специальности.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «СамГТУ» и на сайте https://d24237702.samgtu.ru/.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.377.02
кандидат физико-математических наук, доцент М. Н. Саушкин

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Математическая моделирование гидродинамики и теплообмена в технических установках, в том числе, и в реакторах пиролиза (термического разложения без доступа кислорода) метана, представляет важное направление современной науки. Термическое разложение метана на водород и углерод происходит при температурах от 700 до 1000 °C , что приводит к необходимости учёта зависимости физических свойств от температуры. Краевые задачи в этом случае становятся нелинейными. Для их решения точные аналитические методы не могут быть использованы ввиду невозможности представления решений нелинейных краевых задач в форме бесконечных рядов. В связи с чем возникает необходимость разработки приближенных аналитических методов их решения. Среди них особенно эффективными являются методы, основанные на определении дополнительных граничных условий (ДГУ) и дополнительных искомых функций (ДИФ). Дополнительные граничные условия обладают тем свойством, что их выполнение в одной из граничных точек эквивалентно выполнению в этой точке исходного дифференциального уравнения, что при большом числе приближений приводит к его выполнению и внутри рассматриваемой области, не прибегая к непосредственному интегрированию по пространственной переменной. Применительно к линейным задачам этот метод приводит к решениям, совпадающим с точными аналитическими решениями, представленными в форме бесконечных рядов. Следует однако отметить, что применительно к решению сложных нелинейных задач теплообмена и гидродинамики методы ДГУ и ДИФ пока ещё недостаточно разработаны. В связи с этим тему диссертации, посвященной разработке таких методов и их применения в расчетах тепломассопереноса в реакторах пиролиза метана, следует признать актуальной.

Цель работы

Разработка численно-аналитических методов моделирования линейных и нелинейных задач гидродинамики и теплообмена для установок термического разложения метана.

Задачи исследований

1. Разработка численно-аналитического метода исследования задачи теплопроводности в условиях третьей краевой задачи применительно к реактору термического разложения метана.
2. Разработка метода получения аналитических решений нелинейных задач теплопроводности с температурно-зависящим источником теплоты на основе определения ДИФ и ДГУ и его применение в расчетах теплообмена в реакторах пиролиза метана.
3. Получение точного решения краевой задачи теплопроводности с источником теплоты на основе определения дополнительной искомой функции и дополнительной граничной информации.
4. Разработка метода математического моделирования задачи формирования теплового пограничного слоя на стенках реактора пиролиза метана при переменной вязкости и температуропроводности газа.

Научная новизна

1. Разработан численно-аналитический метод решения задачи теплообмена в условиях третьей краевой задачи для определения температурного состояния

стенки реактора пиролиза метана в нестационарных условиях пуска и останова, отличающийся малым числом членов ряда получаемых решений и их быстрой сходимостью по сравнению с классическими приближенными методами.

2. Разработан метод получения аналитических решений нелинейных задач теплопроводности с температурно-зависящим источником теплоты, позволяющий идентифицировать мощность источника теплоты в условиях индукционного нагрева путем решения обратной задачи.

3. Разработан метод получения численно-аналитических решений задач теплопроводности с источниками теплоты, позволяющий исключить непосредственное интегрирование дифференциального уравнения краевой задачи по пространственной переменной путем его выполнения в граничных точках и сведения задачи к решению обыкновенного дифференциального уравнения (ОДУ).

4. Разработана нелинейная математическая модель теплового пограничного слоя при переменных вязкости и температуропроводности газа для моделирования пиролиза метана в газовом реакторе, позволяющая определить застойные зоны, приводящие к интенсивному отложению углерода на стенках реактора.

Тематика работы соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ:

1. Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий.

2. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

3. Качественные или аналитические методы исследования математических моделей.

4. Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

На защиту выносятся:

1. Численно-аналитический метод решения задачи теплопроводности при несимметричных граничных условиях третьего рода, позволяющий получать быстро сходящиеся решения с малым числом членов ряда.

2. Метод решения нелинейных задач теплопроводности с температурно-зависящими источниками теплоты, позволяющий получать приближённое решение с малым числом членов ряда и выполнять идентификацию мощности источника теплоты в пределах заданной температуры стенки реактора при его индукционном нагреве посредством решения обратной задачи.

3. Метод получения численно-аналитического решения задачи теплопроводности с источником теплоты, позволяющий исключить непосредственное интегрирование исходного дифференциального уравнения по пространственной переменной за счет его выполнения в граничных точках.

4. Нелинейная математическая модель теплового пограничного слоя при переменных вязкости и температуропроводности применительно к анализу скорости и температуры в пограничной области реакционной зоны установки пиролиза метана.

5. Алгоритмы и комплексы программ, реализующих разработанные в диссертации методы решения краевых задач.

Достоверность результатов работы подтверждается корректностью математических постановок, сопоставлением полученных решений с известными аналитическими и численными результатами, а также экспериментальной проверкой результатов на установке пиролиза метана, изготовленной при участии соискателя.

Теоретическая и практическая ценность работы. Теоретическая значимость результатов заключается в разработке метода получения точных и приближенно-аналитических решений линейных и нелинейных краевых задач теплопроводности с использованием дополнительных граничных условий и дополнительных искомых функций. Метод позволяет упростить построение решений сложных краевых задач. Его обоснование базируется на доказанной в данной работе, теореме о выполнении исходного дифференциального уравнения во всей рассматриваемой области при выполнении дополнительных условий на выбранной границе расчетной области.

Практическая ценность состоит в применении полученных решений к расчету теплового состояния стенки реактора пиролиза метана теоретически и экспериментально. Определены особенности ее прогрева в нестационарных режимах, выполнена оценка мощности внутренних источников теплоты при индукционном нагреве и выявлено формирование пристеночных застойных зон, способствующих образованию углеродных отложений на стенках установки пиролиза и ухудшению прогрева метана.

Связь диссертации с государственными программами научных исследований. Диссертация представляет обобщение исследований, выполненных автором по плану работ молодежной лаборатории «Нефтегазовые технологии производства водорода и графита» (проект № FSSE-2024-0014) в Самарском государственном техническом университете.

Внедрение результатов работы. Результаты работы внедрены в ООО «Газпромнефть – Промышленные инновации», а также в учебном процессе Самарского государственного технического университета.

Апробация полученных в диссертации результатов.

Результаты работы обсуждены на Всероссийской (с международным участием) молодёжной конференции «Бутаковские чтения», Томск, 2022, 2023, 2024, 2025 гг.; X Всероссийской (с международным участием) научно-технической конференции молодых исследователей «Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности», Волгоград, 2023, 2024 г.; Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященной 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова, Белгород, 2023 г.; 8-ой Всероссийской научной конференции перспективных разработок молодых ученых «Молодежь и наука: шаг к успеху», Курск, 2025 г.; XXXVIII Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-38», Самара, 2025 г.; Всероссийской конференции «XLI Сибирский теплофизический семинар», Новосибирск, 2025 г.; XXXIX Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-39», Самара, 2026 г.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 21 печатной работе, из них 2 статьи в журнале, включенном в базы данных Scopus и Web of Science, 7 статей – в журналах из перечня ВАК, 12 статей в других изданиях. Получено 2 патента на изобретения, зарегистрировано 4 программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. В работе [3] и [10] диссертанту принадлежит постановка проблем исследований, выполнение расчетной части работы. В работах [1, 2, 4–9, 11, 12], опубликованных в соавторстве, диссертанту в равной степени с другими авторами принадлежат постановки задач, получение решений и анализ результатов исследований.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Общий объём работы составляет 159 страниц; она включает 32 рисунка, 2 таблицы, 149 источников в списке литературы и 3 приложения.

Благодарность. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSSE-2024-0014) в рамках государственного задания Самарского государственного технического университета.

В первой главе диссертации выполнен обзор методов решения краевых задач теплообмена и гидродинамики. Показано, что решения нелинейных краевых задач не могут быть получены по единому алгоритму вследствие ограниченной применимости классических точных аналитических методов, ориентированных преимущественно на линейные задачи. Рассмотрены приближённые методы Ритца, Треффтца, Канторовича, Галеркина, теплового баланса и коллокаций, применение которых к сложным нелинейным задачам сопровождается трудностями при увеличении числа приближений и определении собственных чисел. Особое внимание уделено использованию дополнительных граничных условий и дополнительных искомых функций, позволяющих свести исходное уравнение в частных производных к обыкновенному дифференциальному уравнению, использованных в работах Стефанюк Е. В., Еремина А. В., Федорова Ф. М., Кудинова В. А., Вельмисова П. А., Карташова Э. М. и других. Показано, что при несимметричных граничных условиях третьего рода классическое определение собственных чисел связано с решением задачи Штурма–Лиувилля и трансцендентных уравнений. В диссертации предложен иной подход, при котором собственные числа определяются из алгебраического полинома, получаемого выполнением уравнения задачи Штурма–Лиувилля в дискретных точках области — точках коллокации. По результатам обзора установлена недостаточная разработанность моделей теплового и динамического пограничных слоёв и процессов образования углеродных отложений применительно к реакторам пиролиза метана.

Во второй главе диссертации рассмотрены численно-аналитические методы решения задач теплопроводности при граничных условиях третьего рода на основе метода коллокаций.

Рассмотрим задачу

$$\frac{\partial\Theta(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial\mathrm{Fo}}=\frac{\partial^2\Theta(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial\xi^2}\ (\mathrm{Fo}>0;\quad 0<\xi<1)\,; \tag{1}$$

$$\Theta(\xi,0)=0\,; \tag{2}$$

$$\frac{\partial\Theta(0,\mathrm{Fo})}{\partial\xi} - \mathrm{Bi}_1[\Theta(0,\mathrm{Fo}) + D] = 0\,; \tag{3}$$

$$\frac{\partial\Theta(1,\mathrm{Fo})}{\partial\xi} + \mathrm{Bi}_2[\Theta(1,\mathrm{Fo}) - 1] = 0\,, \tag{4}$$

где $\Theta(\xi,\mathrm{Fo}) = \dfrac{T - T_0}{T_2 - T_0}$; $D = \dfrac{T_0 - T_1}{T_2 - T_0}$; $\mathrm{Fo} = \dfrac{a\tau}{\delta^2}$; $\xi = \dfrac{x}{\delta}$; $\mathrm{Bi}_1 = \dfrac{\alpha_1\delta}{\lambda}$; $\mathrm{Bi}_2 = \dfrac{\alpha_2\delta}{\lambda}$;

T, x, τ – температура, координата, время; λ – теплопроводность; a – температуропроводность; α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи; T_1, T_2 – температуры сред; T_0 – начальная температура; δ – толщина пластины; Bi_1, Bi_2 – числа Био; Θ, ξ, Fo –безразмерные температура, координата, время.

Решение задачи (1)–(4) принимается в виде

$$\Theta(\xi,\mathrm{Fo}) = \Theta_c(\xi) + \Theta_н(\xi,\mathrm{Fo})\,, \tag{5}$$

где $\Theta_c(\xi)$ – решение стационарной задачи с неоднородными условиями (3), (4); $\Theta_н(\xi,\mathrm{Fo})$ – решение нестационарной задачи с однородными условиями.

Решение стационарной задачи принимается в виде

$$\Theta_c(\xi) = F_1 + F_2\xi\,, \tag{6}$$

где F_1, F_2 – постоянные, определяемые из граничных условий (3), (4), имеющие вид $F_1 = \left[(\mathrm{Bi}_2 + \mathrm{Bi}_2 D)/(\mathrm{Bi}_1 + \mathrm{Bi}_2 + \mathrm{Bi}_1\mathrm{Bi}_2)\right] - D$; $F_2 = (\mathrm{Bi}_1\,\mathrm{Bi}_2(D+1))/(\mathrm{Bi}_1 + \mathrm{Bi}_2 + \mathrm{Bi}_1\mathrm{Bi}_2)$.

Задача для функции $\Theta_н(\xi,\mathrm{Fo})$ имеет вид:

$$\frac{\partial\Theta_н(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial\mathrm{Fo}} = \frac{\partial^2\Theta_н(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial\xi^2} \quad (\mathrm{Fo} > 0\,; \quad 0 < \xi < 1)\,; \tag{7}$$

$$\Theta_н(\xi,0) = -\Theta_c(\xi)\,; \tag{8}$$

$$\frac{\partial\Theta_н(0,\mathrm{Fo})}{\partial\xi} - \mathrm{Bi}_1\Theta_н(0,\mathrm{Fo}) = 0\,; \tag{9}$$

$$\frac{\partial\Theta_н(1,\mathrm{Fo})}{\partial\xi} + \mathrm{Bi}_2\Theta_н(1,\mathrm{Fo}) = 0\,. \tag{10}$$

Решение задачи (7)–(10) принимается в виде

$$\Theta_н(\xi,0) = \varphi(\mathrm{Fo})\psi(\xi)\,. \tag{11}$$

Подставляя (11) в (7), для функций $\varphi(\mathrm{Fo})$ и $\psi(\xi)$ получаем уравнения

$$\frac{d\varphi(\mathrm{Fo})}{d\mathrm{Fo}} + \mu\varphi(\mathrm{Fo}) = 0\,; \tag{12}$$

$$\frac{d^2\psi(\xi)}{d\xi^2} + \mu\psi(\xi) = 0\,, \tag{13}$$

где μ – некоторая постоянная.

Интегрируя уравнение (12), имеем

$$\varphi(\mathrm{Fo}) = A\exp(-\mu\mathrm{Fo})\,, \tag{14}$$

где A – постоянная интегрирования.

Подставляя (11) в (9), (10), получаем граничные условия для функции $\psi(\xi)$

$$\frac{d\psi(0)}{d\xi} - \mathrm{Bi}_1\psi(0) = 0\,; \qquad (15) \qquad \frac{d\psi(1)}{d\xi} + \mathrm{Bi}_2\psi(1) = 0\,. \qquad (16)$$

Соотношения (13), (15), (16) представляют краевую задачу Штурма–Лиувилля. Её решение принимается в виде

$$\psi(\xi) = 1 + \sum_{k=1}^{n} b_k \xi^k\,, \qquad (17)$$

где b_k $(k = \overline{1,6})$ – неизвестные постоянные, определяемые из уравнения (13), которое в дальнейшем полагалось $n = 6$, т. е. будем выполнять в четырех точках коллокации ($\xi = 0$; 0,2; 0,8; 1,0) и из граничных условий (15), (16) (дальнейшие преобразования выполнены при $\mathrm{Bi}_1 = 3$; $\mathrm{Bi}_2 = 2$, соответствующих условиям теплообмена на установке пиролиза метана).

Подставляя (17) (при шести членах ряда $(n = 6)$) в указанные условия, для определения b_k получаем систему шести алгебраических уравнений. Подставив найденные из её решения b_k в (17), а подставив (17) в (13) при $\xi = 0{,}5$ получим алгебраический полином пятой степени относительно собственных чисел μ_k.

Его корни: $\mu_1 = 3{,}404306$; $\mu_2 = 17{,}6496$; $\mu_3 = 46{,}4783$; $\mu_4 = 189{,}7979$; $\mu_5 = 280{,}1699$. Точные значения собственных чисел $\mu_1 = 3{,}404290543$; $\mu_2 = 17{,}683680068$; $\mu_3 = 48{,}569017423$; $\mu_4 = 98{,}357137508$; $\mu_5 = 167{,}633133513$. Полученные результаты показывают, что при использовании небольшого числа точек коллокации наиболее точно определяется первое собственное число, тогда как для собственных чисел более высоких порядков точность снижается. Для её повышения необходимо увеличить число точек, в которых выполняется уравнение (13).

Собственные функции для каждого собственного числа находятся из (17):

$$\psi_i(\xi) = 1 + \sum_{k=1}^{6} b_k(\mu_i)\xi^k \quad (i = \overline{1,5})\,. \qquad (20)$$

Подставляя (14), (18) в (11), имеем

$$\Theta_{\text{н}}(\xi, \mathrm{Fo}) = \sum_{i=1}^{5}\left[A_i \exp(-\mu_i \mathrm{Fo})\left(1 + \sum_{k=1}^{6} b_k(\mu_i)\xi^k\right)\right]. \qquad (19)$$

Подставляя (6), (19) в (5), находим

$$\Theta(\xi, \mathrm{Fo}) = F_1 + F_2\xi + \sum_{i=1}^{5}\left[A_i \exp(-\mu_i \mathrm{Fo})\left(1 + \sum_{k=1}^{6} b_k(\mu_i)\xi^k\right)\right]. \qquad (20)$$

Постоянные интегрирования A_i $(i = \overline{1,5})$ находятся из интеграла взвешенной невязки начального условия (2):

$$\int_0^1 \left[\sum_{i=1}^{5} A_i \left(1 + \sum_{k=1}^{6} b_k(\mu_i)\xi^k \right) + F_1 + F_2\xi \right] \psi_j(\xi) d\xi = 0 \quad (j = i = \overline{1,5}) \ . \qquad (21)$$

Соотношение (21) относительно постоянных интегрирования A_i $(i = \overline{1,5})$ представляет систему пяти алгебраических линейных уравнений. Её решение:

$$A_1 = -0,2751 ; \ A_2 = 0,1365 ; A_3 = -0,0530 ; A_4 = 0,0504 ; A_5 = -0,0498 . \qquad (22)$$

Анализ расчётов по (20), в сравнении с точным решением[1], показывает, что в чебышевской норме при $0,01 \le \mathrm{Fo} < \infty$ их расхождение составляет 2%.

С целью повышения точности определения собственных чисел уравнение (13) выполнялось в десяти точках коллокации ($\xi = 0$; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0). С учётом граничных условий (15), (16) для определения двенадцати неизвестных коэффициентов собственной функции получена система двенадцати алгебраических уравнений. Из корней характеристического полинома, как и в случае использования четырёх точек коллокации, для построения температурного решения использованы первые пять собственных чисел: $\mu_1 = 3,404291$; $\mu_2 = 17,683682$; $\mu_3 = 48,569408$; $\mu_4 = 98,246502$; $\mu_5 = 166,214779$, увеличение числа точек коллокации обеспечивает повышение точности определения первых пяти собственных чисел.

Формула (20) была использована для расчётов температурного состояния металлической стенки реактора пиролиза метана.

Далее во второй главе диссертации представлены результаты разработки аналитического метода решения нелинейной задачи теплопроводности с температурно-зависящим источником теплоты в следующей математической постановке:

$$c\rho \frac{\partial T(x,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda(T) \frac{\partial T(x,\tau)}{\partial x} \right] + \omega(T) \quad (\tau > 0 ; \quad 0 < x < \delta) ; \qquad (23)$$

$$T(x,0) = 0 ; \qquad (24) \qquad T(0,\tau) = \Delta t ; \qquad (25)$$

$$\partial T(\delta,\tau) / \partial x = 0 ; \qquad (26)$$

где $T = t - t_0$; t, x, τ – температура, координата, время; $\lambda(t)$ – коэффициент теплопроводности; c – теплоемкость; ρ – плотность; t_0 – начальная температура; t_1 – температура при $x = 0$ ($t_1 > t_0$); $\omega(T)$ – мощность источника теплоты; δ – толщина пластины; $\Delta t = t_1 - t_0$.

Найдем решение в случае

$$\lambda(T) = \lambda_0(1 + \beta T) ; \ (27) \qquad \omega(T) = \omega_0(1 + \gamma T) , \qquad (28)$$

где λ_0, ω_0 – теплопроводность и мощность источника при $t = t_0$, то есть при $T = 0$; β, γ – коэффициенты.

---

[1] Гудмен, Т. Применение интегральных методов в нелинейных задачах нестационарного теплообмена / Т. Гудмен // Проблемы теплообмена: сборник научных трудов. М.: Атомиздат, 1967. С. 41–96.

Для приведения задачи (23)–(26) к безразмерному виду обозначим: $\Theta = T/\Delta t$; $\mathrm{Fo} = a_0\tau/\delta^2$; $\xi = x/\delta$, где $a_0 = \lambda_0/(c\rho)$.

Задача (25) – (28) принимает вид

$$\frac{\partial\Theta(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial\mathrm{Fo}} = \frac{\partial}{\partial\xi}\left[\left(1+\beta\Delta t\Theta(\xi,\mathrm{Fo})\right)\frac{\partial\Theta(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial\xi}\right] + \mathrm{Po}\left(1+\gamma\Delta t\Theta(\xi,\mathrm{Fo})\right) \qquad (29)$$

$$\Theta(\xi,0) = 0\,; \quad (30) \qquad \Theta(0,\mathrm{Fo}) = 1\,; \quad (31) \qquad \partial\Theta(1,\mathrm{Fo})/\partial\xi = 0\,, \qquad (32)$$

где Θ , Fo , ξ – безразмерные температура, время, координата; $\lambda_0 = a_0 c\rho$; $\mathrm{Po} = \omega_0\delta^2/(\lambda_0\Delta t)$ – число Померанцева.

Введём дополнительную функцию $q(\mathrm{Fo})$ последовательно в точках: $\xi = 0{,}25;\ \xi = 0{,}5;\ \xi = 0{,}75;\ \xi = 1{,}0$. Найдем сначала решение при задании дополнительной функции в точке $\xi = 0{,}25$, то есть

$$q(\mathrm{Fo}) = \Theta(0{,}25;\ \mathrm{Fo}) \ . \qquad (33)$$

Решение задачи (29) – (32) принимается в виде

$$\Theta(\xi,\mathrm{Fo}) = 1 - \sum_{k=0}^{n} b_k(q)\sin\left(\frac{r\pi}{2}\xi\right) , \qquad (34)$$

где $b_k(q)$ $(k = \overline{1,n})$ – неизвестные функции; $r = 2k-1$.

Соотношение (34) удовлетворяет условиям (31), (32). Неизвестные $b_k(q)$ находятся из (33) и некоторых дополнительных условий, задаваемых на границе и в точке $\xi = 0{,}25$, которые представлены ниже.

Подставив (34) (ограничиваясь одним членом ряда) в (33), относительно $b_1(q)$ получаем алгебраическое уравнение, после решения которого соотношение (34) будет:

$$\Theta(\xi,\mathrm{Fo}) = 1 + \frac{2(q(\mathrm{Fo})-1)}{\sqrt{2-\sqrt{2}}}\sin\left(\frac{\pi\xi}{2}\right) . \qquad (35)$$

Осредняя уравнение (29), находим интеграл теплового баланса

$$\int_0^1 \left\{\frac{\partial\Theta(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial\mathrm{Fo}} - \frac{\partial}{\partial\xi}\left[\left(1+\beta\Delta t\Theta(\xi,\mathrm{Fo})\right)\frac{\partial\Theta(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial\xi}\right] - \mathrm{Po}\left(1+\gamma\Delta t\Theta(\xi,\mathrm{Fo})\right)\right\} d\xi = 0\,. \qquad (36)$$

Подставляя (35) в (36), находим

$$\begin{aligned} &4\frac{dq(\mathrm{Fo})}{d\mathrm{Fo}} + \pi^2(1+\beta\Delta t)\left(q(\mathrm{Fo})-1\right) - \\ &-\mathrm{Po}\left[\pi\sqrt{2-\sqrt{2}} - 4\gamma\Delta t + \gamma\pi\Delta t\sqrt{2-\sqrt{2}} + 4\gamma\Delta t q(\mathrm{Fo})\right] = 0\cdot \end{aligned} \qquad (37)$$

Интегрируя уравнение (37) и подставляя полученное решение в (35), находим

$$\Theta(\xi,\mathrm{Fo}) = 1 + \left(\sin\left(\frac{\pi\xi}{2}\right)\cdot\left[\frac{2\pi\mathrm{Po}\sqrt{2-\sqrt{2}}\left(1+\gamma\Delta t\right)}{\pi^2+\pi^2\beta\Delta t - 4\gamma\mathrm{Po}\Delta t} + \right.\right.$$

$$+2C\exp\left(\left(-\frac{\pi^2}{4}+\gamma \mathrm{Po}\Delta t-\frac{\pi^2\beta\Delta t}{4}\right)\mathrm{Fo}\right)\Bigg]\Bigg]\Bigg/\sqrt{2-\sqrt{2}}, \quad (38)$$

где коэффициент при Fo под знаком экспоненты

$$\nu_1=-\frac{\pi^2}{4}+\gamma \mathrm{Po}\Delta t-\frac{\pi^2\beta\Delta t}{4}$$

представляет первое собственное число задачи (29)–(32).

Постоянная C находится из интеграла взвешенной невязки начального условия (30). Формула для постоянной C имеет вид:

$$C=-\frac{2\sqrt{2-\sqrt{2}}}{\pi}-\frac{\pi\sqrt{2-\sqrt{2}}\,\mathrm{Po}(\gamma\Delta t+1)}{\pi^2+\pi^2\beta\Delta t-4\gamma \mathrm{Po}\Delta t}\ .$$

Формула (38) представляет первое приближение задачи (29)–(32). Если принять $\mathrm{Po}=0$; $\gamma=0$; $\beta=0$, то решение (38) принимает вид

$$\Theta(\xi,\mathrm{Fo})=1-\frac{4}{\pi}\exp(-\nu_1^*\mathrm{Fo})\sin\left(\frac{\pi\xi}{2}\right), \quad (39)$$

где $\nu_1^*=\pi^2/4$ – первое собственное число линейной задачи без источника теплоты, совпадающее с точным его значением.

Расчёты по (39) при $0{,}1\le \mathrm{Fo}<\infty$ отличаются от точных[2] значений не более чем на 3 % в чебышевской норме при $\mathrm{Fo}=0{,}12$.

Формула (38) позволяет разделить стационарные режимы и режимы теплового взрыва. В случае, если коэффициент показателя экспоненты $(-\pi^2(1+\beta\Delta t)/4+\gamma \mathrm{Po}\Delta t)>0$, то с увеличением числа Fo будет происходить неограниченное возрастание температуры. При $(-\pi^2(1+\beta\Delta t)/4+\gamma \mathrm{Po}\Delta t)<0$ неограниченное возрастание числа Fo приводит к стационарному состоянию.

Увеличение точности решения достигается за счет увеличения числа членов ряда (34), коэффициенты $b_k(q)$ которого определяются из соотношений (33) и дополнительных условий, задаваемых на границе и во внутренних точках рассматриваемой области. Выполнение этих условий приводит к цепочной системе алгебраических уравнений относительно коэффициентов $b_k(q)$. После их определения получается обыкновенное дифференциальное уравнение для дополнительной функции $q(\mathrm{Fo})$. Дальнейшая последовательность получения решения повторяется аналогично первому приближению.

Расчеты, выполненные при различном выборе внутренних точек, показали независимость получаемого аналитического решения от выбора внутренней точки. Для линейной задачи с постоянным источником теплоты ($\beta=0$; $\gamma=0$) данным методом получено точное решение в виде бесконечного ряда:

---

[2] Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.

$$\Theta(\xi,\mathrm{Fo})=\frac{1}{\mathrm{Po}}+\frac{1}{2}(1-\xi^2)-\sum_{k=1}^{\infty}A_k\left(1+\frac{1}{\nu_k^2}\right)e^{-\nu_k^2\mathrm{Fo}}\cos(\nu_k\xi),$$

где $A_k=\dfrac{4(-1)^k}{r\pi}$; $\nu_k=\dfrac{r\pi}{2}$; $r=2k-1$; $n=3$; $k=1,2,\ldots$.

Используя решение (38), найдена мощность постоянного источника теплоты $(\gamma=0)$, при которой температура стенки в точке $\xi=1{,}0$ в стационарном состоянии будет равна $1000\,^{\circ}\mathrm{C}$. Решение подобной задачи использовано при электромагнитном способе прогрева реактора пиролиза метана с целью недопущения его перегрева и плавления.

В третьей главе диссертации представлены результаты разработки математической модели теплового пограничного слоя применительно к реактору пиролиза метана. При пиролизе метана образующийся на внутренних стенках реактора углерод уменьшает эффективность прогрева метана и производительность реактора. Рассмотрим математические постановки задач динамического и теплового пограничных слоев для плоскопараллельного канала. Постановка задачи динамического пограничного слоя:

$$\upsilon_x\frac{\partial\upsilon_x}{\partial x}+\upsilon_y\frac{\partial\upsilon_x}{\partial y}=\nu\frac{\partial^2\upsilon_x}{\partial y^2};\qquad(40)\qquad\frac{\partial\upsilon_x}{\partial x}+\frac{\partial\upsilon_y}{\partial y}=0;\qquad(41)$$

$$\upsilon_x\big|_{y=0}=\upsilon_y\big|_{y=0}=0;\qquad(42)\qquad\upsilon_x\big|_{y=\delta(x)}=\upsilon=\mathrm{const};\qquad(43)$$

$$\left.\frac{\partial\upsilon_x}{\partial y}\right|_{y=\delta(x)}=0;\qquad(44)\qquad\left.\frac{\partial^2\upsilon_x}{\partial y^2}\right|_{y=0}=0,\qquad(45)$$

где ν – кинематическая вязкость; x, y – координаты; υ_x, υ_y – составляющие скорости по осям; $\delta(x)$ – толщина динамического пограничного слоя; υ – скорость невозмущенного потока за его пределами; поэтому на границе скорость υ_x достигает значения υ.

Ввиду нелинейности задачи (40)–(45), её точные аналитические решения не получены. Для упрощения получения решения вводится допущение о том, чтобы решение удовлетворяло не уравнениями (40), (41), а их осредненным аналогам. Исходя из этого допущения, относительно распределения скорости в динамическом слое получено следующее интегральное уравнение

$$\frac{d}{dx}\int_0^{\delta}(\upsilon_x-\upsilon)\upsilon_x dy=-\nu\left(\frac{\partial\upsilon_x}{\partial y}\right)_{y=0}.\qquad(46)$$

В случае переменной по координате y вязкости $\nu(y)=\nu^*(1-\beta y)$ уравнение (46) принимает вид

$$\upsilon_x\frac{\partial\upsilon_x}{\partial x}+\upsilon_y\frac{\partial\upsilon_x}{\partial y}=-\nu^*\beta\frac{\partial\upsilon_x}{\partial y}+\nu^*(1-\beta y)\frac{\partial^2\upsilon_x}{\partial y^2},\qquad(47)$$

где $\nu(y)$ – переменная по координате y кинематическая вязкость; ν^* – кинематическая вязкость при $y=0$ $(y<1)$; β – коэффициент.

К граничным условиям (42)–(45) добавляется дополнительное граничное условие, получаемое из требования выполнения уравнения (47) непосредственно на стенке $y=0$. С учётом условий (42) и (45) из уравнения (47) следует

$$\left.\frac{\partial \upsilon_x}{\partial y}\right|_{y=0}=0. \qquad (48)$$

Выполнение искомым решением ДГУ (48) означает выполнение уравнения (47) в точке $y=0$.

Интегральное уравнение для υ_x будет

$$\frac{\partial}{\partial x}\int_0^{\delta(x)}\upsilon_x(\upsilon_x-\upsilon)dy=-\nu^*\beta\int_0^{\delta(x)}\frac{\partial \upsilon_x}{\partial y}dy+\int_0^{\delta(x)}\nu^*(1-\beta y)\frac{\partial^2\upsilon_x}{\partial y^2}dy\ . \qquad (49)$$

Обозначим:

$$Q_x=\upsilon_x/\upsilon\ ;\qquad \gamma=\nu^*/\upsilon\ . \qquad (50)$$

С учётом обозначений (50) постановка задачи принимает вид

$$\frac{\partial}{\partial x}\int_0^{\delta(x)}Q_x(Q_x-1)dy+\gamma\beta\int_0^{\delta(x)}\frac{\partial Q_x}{\partial y}dy=\gamma\int_0^{\delta(x)}(1-\beta y)\frac{\partial^2 Q_x}{\partial y^2}dy\ ; \qquad (51)$$

$$Q_x(x,0)=0\ ; \qquad (52) \qquad Q_x(x,\delta)=1\ ; \qquad (53) \qquad \partial Q_x(x,\delta)/\partial y=0\ , \qquad (54)$$

$$\partial Q_x(x,0)/\partial y=0\ ; \qquad (55) \qquad \partial^2 Q_x(x,0)/\partial y^2=0\ . \qquad (56)$$

Примем решение задачи (51)–(56) в виде

$$Q_x(x,y)=\sum_{k=1}^{n}a_k(\delta(x))\varphi_k(y)\ , \qquad (57)$$

где $a_k(\delta(x))$ – неизвестные коэффициенты; $\varphi_k(y)=y^{2k-1}$ – координатные функции $(k=\overline{1,n})$.

Вид координатных функций $\varphi_k(y)=y^{2k-1}$ выбран таким образом, что принимаемое решение автоматически удовлетворяет условиям (52) и (56). Для определения неизвестных коэффициентов $a_k(\delta(x))$ используются оставшиеся условия (53)–(55). В третьем приближении, ограничиваясь тремя членами ряда $(n=3)$, из этих условий получаем систему трёх алгебраических уравнений относительно a_1, a_2, a_3, решение которой имеет вид: $a_1=0$; $a_2=5/(2\delta^3)$; $a_3=-3/(2\delta^5)$. Подставляя эти коэффициенты в (57), получаем

$$Q_x(x,y)=\frac{\upsilon_x}{\upsilon}=\frac{5}{2}\left(\frac{y}{\delta(x)}\right)^3-\frac{3}{2}\left(\frac{y}{\delta(x)}\right)^5. \qquad (58)$$

Подставляя (58) в (51), для $\delta(x)$ получаем уравнение

$$d\delta(x)/dx=\gamma\beta\ . \qquad (59)$$

Его решение (при $\delta(0)=0$) будет

$$\delta(x) = \gamma\beta x \ . \qquad (60)$$

Подставляя (60) в (58), для параметров установки пиролиза метана $\gamma = \nu^* / \upsilon = 0{,}2$ м , $\beta = 0{,}25$ м$^{-1}$ находим

$$Q_x(x,y) = \upsilon_x / \upsilon = 2 \cdot 10^4 \left(\frac{y}{x}\right)^3 - 4{,}8 \cdot 10^6 \left(\frac{y}{x}\right)^5 \ . \qquad (61)$$

Анализ решения (61) показывает, что кривые скорости касательны к оси y (выполнение условия (55)) и, следовательно, изотахи на начальном участке координаты y перпендикулярны к продольной оси x при практически нулевой скорости течения (застойный участок) (рис. 1).

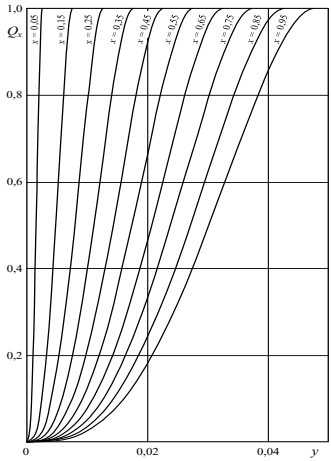


Рис. 1. Изменение скорости



Рис. 2. Отложения пиролизного углерода на внутренней поверхности элемента реактора после проведения процесса пиролиза метана

Находящийся в застойной зоне метан, имеющий высокую температуру, интенсивно пиролизируется с отложением образующегося углерода на стенках.

После проведения процесса пиролиза метана был выполнен визуальный осмотр внутренней поверхности элемента реактора, на которой образовался слой пиролизного углерода (рис. 2). Осмотр показал наличие плотных углеродных отложений на стенке реактора и частичное уменьшение его проходного сечения. При рассмотрении отделившегося слоя установлено, что непосредственно у стенки углерод имеет более плотную структуру, тогда как по мере удаления от стенки слой становится рыхлым. Данный результат качественно подтверждает полученный расчетный вывод о формировании пристеночной застойной зоны, в которой создаются условия для разложения метана и последующего отложения углерода.

Математическая постановка задачи теплового пограничного слоя при переменном по координате y коэффициенте температуропроводности $a(y) = a^*(1 - zy)$ где a^* – коэффициент температуропроводности газа при $y = 0$ (при $t(x,0) = t_{\text{ст}}$); z – коэффициент, характеризующий изменение температу-

ропроводности по координате y, м$^{-1}$, представляется в виде

$$\frac{d}{dx}\int_0^{\Delta(x)} \upsilon_x\left[t(x,y)-t_{\text{ср}}\right]dy = \int_0^{\Delta(x)} \frac{d}{dy}\left[a^*(1-zy)\frac{\partial t(x,y)}{\partial y}\right]dy\,; \qquad (62)$$

$$t(x,0)=t_{\text{ст}}\,; \quad (63) \qquad t(x,\Delta)=t_{\text{ср}}\,; \quad (64) \qquad \partial t(x,\Delta)/\partial y = 0\,, \quad (65)$$

где $t(x,y)$ – температура газа в тепловом слое; $t_{\text{ср}}$ – температура основного потока; $t_{\text{ст}}$ – температура стенки; υ_x – скорость в динамическом слое; $\Delta(x)$ – толщина теплового слоя.

Для того чтобы исходное уравнение энергии выполнялось в граничной точке $y=0$, к основным граничным условиям (63)–(65) необходимо добавить дополнительные граничные условия, получаемые из требования выполнения исходного дифференциального уравнения на границе:

$$\frac{\partial t(x,0)}{\partial y}=0\,; \qquad (66) \qquad \frac{\partial^2 t(x,0)}{\partial y^2}=0\,. \qquad (67)$$

Обозначим: $\Theta=(t-t_{\text{ст}})/(t_{\text{ср}}-t_{\text{ст}})$. С учётом принятого обозначения задача (62)–(67) принимает вид

$$\frac{d}{dx}\int_0^{\Delta(x)} \upsilon_x(\Theta(x,y)-1)\,dy = -a^* z\int_0^{\Delta(x)} \frac{\partial\Theta(x,y)}{\partial y}dy + a^*\int_0^{\Delta(x)} (1-zy)\frac{\partial^2\Theta(x,y)}{\partial y^2}dy\,; \qquad (68)$$

$$\Theta(x,0)=0\,; \quad (69) \qquad \Theta(x,\Delta(x))=1\,; \quad (70) \qquad \partial\Theta(x,\Delta(x))/\partial y=0\,; \quad (71)$$

$$\frac{\partial\Theta(x,0)}{\partial y}=0\,; \qquad (72) \qquad \frac{\partial^2\Theta(x,0)}{\partial y^2}=0\,. \qquad (73)$$

Примем решение задачи в следующем виде

$$\Theta(x,y)=\sum_{k=1}^{n} b_k(\Delta(x))\varphi_k(y)\,, \qquad (74)$$

где $b_k(\Delta(x))$ – неизвестные коэффициенты; $\varphi_k(y)=y^{2k-1}$ – координатные функции $(k=\overline{1,n})$.

Зависимость (74) удовлетворяет условиям (69), (73). Подставляя (74) (при $n=3$) в (70)–(72), для $b_k(\Delta(x))$ имеем систему трёх уравнений. Ее решение: $b_1=0$; $b_2=5/(2\Delta^3)$; $b_3=-3/(2\Delta^5)$. Формула (74) будет

$$\Theta(x,y)=\frac{5}{2}\left(\frac{y}{\Delta(x)}\right)^3-\frac{3}{2}\left(\frac{y}{\Delta(x)}\right)^5. \qquad (75)$$

Подставив (75) в (68), находим

$$\frac{d}{dx}\int_0^{\Delta(x)} \upsilon\left(\frac{5}{2}\frac{y^3}{\delta(x)^3}-\frac{3}{2}\frac{y^5}{\delta(x)^5}\right)\left(\frac{5}{2}\frac{y^3}{(\Delta(x))^3}-\frac{3}{2}\frac{y^5}{(\Delta(x))^5}-1\right)dy = \\ = -a^* z + a^*\int_0^{\Delta(x)} (1-zy)\left(15\frac{y}{(\Delta(x))^3}-30\frac{y^3}{(\Delta(x))^5}\right)dy. \qquad (76)$$

Соотношение (76) после вычисления интегралов приводится к следующему обыкновенному дифференциальному уравнению

$$\frac{95}{1848}\upsilon\frac{d(\Delta(x))}{dx}+a^{*}z=0\,. \qquad (77)$$

Интегрируя уравнение (77) при начальном условии $\Delta(x)\big|_{x=0}=0$, находим

$$\Delta(x)=\frac{95}{1848}\frac{a^{*}z}{\upsilon}x\,. \qquad (78)$$

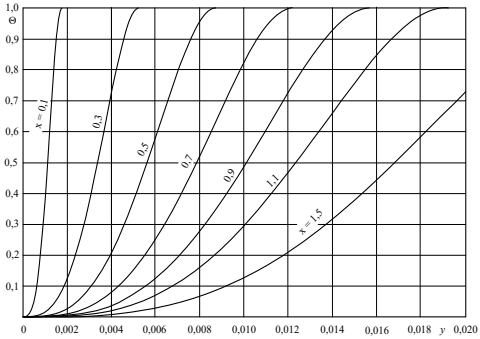


Рис. 3. Изменение температуры в тепловом пограничном слое

Соотношения (75), (78) являются решением задачи (68)–(73) в третьем приближении. Расчёты по (75) (при $z=0,9$; $a=10^{-4}$ м^2/с; $\upsilon=0,1$ м/с) представлены на рис. 3, из которого следует, что температурные кривые касательны к оси y (выполнение условия (72)). Следовательно, изотермы на начальном участке координаты y перпендикулярны оси x при температуре, практически равной температуре стенки реактора. В связи с чем, формирование теплового пограничного слоя будет происходить за пределами участка координаты y с постоянной температурой.

Ввиду высокой температуры газа в пристеночной области происходит интенсивное отложение углерода, что подтверждается результатами экспериментальных исследований, выполненных на установке пиролиза метана, разработанной в молодёжной опытно-промышленной лаборатории «Нефтегазовые технологии получения водорода и графита» Самарского государственного технического университета (рис. 4 а, б).

Установка включает: 1 – реактор пиролиза метана; 2 – газовая печь, предназначенная для нагрева реактора путем сжигания другого метана, являющегося топливом для печи; 3 – тепловая изоляция; 4 – выхлопные трубы; 5 – горелки для сжигания метана; 6 – краны; 7 – ёмкости для метана; 8 – трубка подачи метана; 9 – трубка отбора метано-водородной смеси; 10 – калорифер, в котором для охлаждения выходящих из печи газов используется водопроводная вода 11; 12 – трубка слива дистиллированной воды, получаемой в результате глубокого охлаждения уходящих газов.

Выполнен расчёт площади поверхности нагрева пластинчатого калорифера 10, предназначенного для охлаждения дымовых газов, выходящих из газовой печи, до температуры точки росы содержащихся в них водяных паров. Целью расчёта было определение геометрических параметров теплообменной поверхности калорифера, необходимой для эффективной утилизации тепла и получения дистиллированной воды в качестве побочного продукта.

а) б)



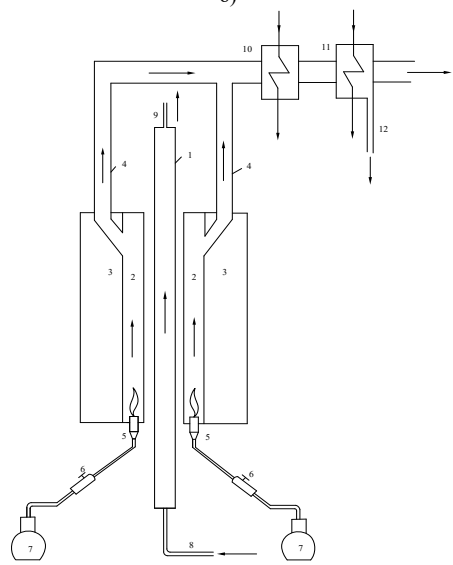


Рис. 4. Установка пиролиза метана. а – фото; б – схема

В результате расчётов были определены: количество теплоты, отбираемой от газа охлаждающей водой (Q = 5525 Вт), средние температуры газа и воды (375 °С и средняя температура 35 °С соответственно), массовая скорость газа и воды, а также площадь теплообменной поверхности калорифера, которая составила F = 5,68 м². При сжигании 1м³ метана в печи удалось получить до 0,55 кг чистой дистиллированной воды, что подтверждает возможность эффективного использования тепла уходящих газов не только для нагрева воды, но и для получения ценного побочного продукта. Нагретая в калорифере вода может использоваться в системах отопления или в других технологических процессах, что повышает общую энергоэффективность установки. Таким образом, расчёт показал, что использование калорифера в составе установки пиролиза метана позволяет эффективно утилизировать теплоту дымовых газов, повысить экономичность и экологичность процесса, а также расширить функциональные возможности установки за счёт получения дополнительных полезных продуктов.

В четвертой главе представлены разработанные алгоритмы и программные комплексы, реализующие методы математического моделирования процессов тепломассопереноса в реакторах термического разложения метана. Программная реализация численно-аналитических методов выполнена с использованием системы компьютерной алгебры MathCAD 15.0, а также языка программирования Python.

В приложениях приведены акты внедрения и свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, патенты на изобретения.

Основные выводы и результаты работы

1. Разработан численно-аналитический метод решения задач теплопроводности с несимметричными граничными условиями третьего рода на основе метода коллокаций, позволяющий сводить решение исходного уравнения к системе алгебраических уравнений. Выполнение начального условия также сводится к системе алгебраических уравнений. Разработанный метод был применён для расчёта стенки реактора пиролиза метана, что позволило определить температуру на внутренней его поверхности, уровень которой определяет процесс пиролиза и отложения углерода на стенках.

2. Используя дополнительные функции и условия на границе, решены нелинейные задачи с температурно-зависящим источником теплоты путем сведения уравнения в частных производных к обыкновенному уравнению для дополнительной функции. Из его решения находятся собственные числа, которые в классических методах находятся из задачи Штурма–Лиувилля. Полученное решение использовано для оценки мощности теплового источника, при которой температура стенки реактора не превышает заданной величины при электромагнитном нагреве. Тепловой источник инициируется индуктором, формирующим электромагнитное поле.

3. Используя дополнительную функцию и дополнительные условия, найдено решение задачи теплопроводности с источником теплоты, в частных случаях совпадающее с точным решением, полученным с помощью классических методов. Следует, отметить, что процесс получения решения классическими методами является значительно более трудоемким по сравнению с разработанным в диссертации методом. С целью теоретического обоснования метода доказана теорема, согласно которой выполнение уравнения и дополнительных граничных условий на выбранной граничной стороне расчетной области при большом числе приближений приводит к его выполнению и внутри рассматриваемой области, не прибегая к его непосредственному интегрированию по пространственной переменной.

4. Разработаны нелинейные математические модели динамического и теплового пограничных слоев при переменных по поперечной координате вязкости и температуропроводности газа. Их использование показало наличие застойных зон вблизи стенки. Так как температура стенки больше температуры газа, то, следовательно, газ в застойных зонах этой области имеет максимальную температуру, что способствует интенсивному отложению углерода на внутренней поверхности стенки реактора.

5. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для численно – аналитического решения следующих задач: моделирование нестационарного теплообмена в реакторах с граничными условиями третьего рода; решение нелинейной задачи теплопроводности с использованием дополнительной искомой функции и интеграла теплового баланса; определение мощности внутреннего источника теплоты по температурному отклику; расчет теплообменной поверхности калорифера реактора пиролиза метана с целью охлаждения дымовых газов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях

[1] Research of thermal explosion conditions in nonlinear heat conduction problems with a nonlinear heat source / V. A. Kudinov, K. V. Trubitsyn, ***K. V. Kolotilkina*** [et al.] // Lobachev-

skii Journal of Mathematics. 2024. Vol. 45, No. 5. P. 2321–2327. DOI 10.1134/S1995080224602443. EDN BJHROZ. (***WoS, Scopus***)

[2] Kolotilkina, K. V. Formation of dynamic and thermal boundary layers in a methane pyrolysis with variable viscosity and thermal diffusivity / ***K. V. Kolotilkina***, S. V. Zaitsev, E. V. Stephanyuk, V. A. Kudinov // Thermophysics and Aeromechanics. 2026. Vol. 33, No. 1. P. 101–107. DOI 10.1134/S0869864326010129. (***Scopus***)

[3] Колотилкина, К. В. Граничный метод исследования температурного состояния стенки реактора пиролиза метана / ***К. В. Колотилкина*** // Современные наукоемкие технологии. 2026. № 6. С. 117–123. DOI 10.17513/snt.40824. EDN LWTZKN. (***ВАК***)

[4] Колотилкина, К. В. Моделирование температурного состояния стенки реактора пиролиза метана при переменных во времени коэффициенте теплоотдачи и температуре среды / ***К. В. Колотилкина***, Е. В. Стефанюк, В. А. Панова // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. 2026. Т. 30, № 2. С. 430–448. DOI 10.14498/vsgtu2213. EDN MSWQFG. (***ВАК***)

[5] Формирование нестационарного профиля скорости в плоском канале / В. А. Кудинов, К. В. Трубицын, Т. Е. Гаврилова, ***К. В. Колотилкина*** [и др.] // Известия вузов. Физика. 2024. Т. 67, № 1(794). С. 63–72. DOI 10.17223/00213411/67/1/8. EDN BRGMDU. (***ВАК***)

[6] Аналитические решения задач теплопроводности с зависящими от времени граничными условиями / К. В. Трубицын, Е. В. Котова, Т. Е. Гаврилова, ***К. В. Колотилкина*** [и др.] // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. 2023. № 3(326). С. 57–64. DOI 10.53598/2410-3225-2023-3-326-57-64. EDN NCACLY. (***ВАК***)

[7] Дополнительные граничные условия в задачах теплопроводности с неоднородными граничными условиями / К. В. Трубицын, Е. В. Котова, Т. Е. Гаврилова, ***К. В. Колотилкина*** [и др.] // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2023. № 4. С. 89–96. DOI 10.24143/2072-9502-2023-4-89-96. EDN RQKNDS. (***ВАК***)

[8] Дополнительные граничные условия в задачах теплопроводности с переменным по координате начальным условием / К. В. Трубицын, Т. Е. Гаврилова, Е. В. Котова, ***К. В. Колотилкина*** [и др.] // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2023. № 6. С. 88–94. DOI 10.17588/2072-2672.2023.6.088-094. EDN SHOKWO. (***ВАК***)

[9] Получение аналитических решений краевых задач на основе дополнительных граничных условий / К. В. Трубицын, Е. В. Котова, Т. Е. Гаврилова, ***К. В. Колотилкина*** [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Физика. Математика. 2024. № 2. С. 85–93. EDN HOOHPD. (***ВАК***)

Публикации в других научных изданиях

[10] Колотилкина, К. В. Применение энергоэффективных калориферов в теплоэнергетике / ***К. В. Колотилкина*** // Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности : Материалы XI Всероссийской (с международным участием) научно-технической конференции молодых исследователей, Волгоград, 22–27 апреля 2024 года. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2024. С. 343–345. EDN RQDSUE.

[11] Зайцев, С. В. Теплоутилизаторы – ключ к эффективному энергосбережению / С. В. Зайцев, ***К. В. Колотилкина*** // Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техно-

сферной безопасности : Материалы X Всероссийской (с международным участием) научно-технической конференции молодых исследователей, Волгоград, 24–29 апреля 2023 года / Под общей редакцией Н.Ю. Ермиловой, И.Е. Степановой. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2023. С. 344–346. EDN KDYXJU.

[12] Зайцев, С. В. Исследование аналитического решения гиперболического уравнения теплопроводности / С. В. Зайцев, ***К. В. Колотилкина***, И. А. Иванов // Молодежь и наука: шаг к успеху : Сборник научных статей 8-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок молодых ученых. В 4-х томах, Курск, 20–21 марта 2025 года. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2025. С. 58–63. EDN SAMUVP.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

[1] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025663271 Российская Федерация. Программный комплекс для численно-аналитического решения задач исследования условий теплового взрыва в нелинейных системах теплопроводности : заявл. 28.04.2025 : опубл. 27.05.2025 / ***К. В. Колотилкина***, С. В. Зайцев, В. А. Кудинов ; заявитель ФГБОУ ВО «СамГТУ». EDN CHTVRT.

[2] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026661484 Российская Федерация. Цифровой двойник процесса пиролиза углеводородного сырья : заявл. 08.04.2026 : опубл. 22.04.2026 / Ю. А. Крюков, Е. В. Керосиров, Д. А. Васин, ***К. В. Колотилкина*** [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО «СамГТУ». EDN RCULLR.

[3] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026668971 Российская Федерация. Определение площади теплообменной поверхности калорифера по параметрам теплоносителей : заявл. 24.06.2026 : опубл. 08.07.2026 / ***К. В. Колотилкина***, Е. В. Стефанюк ; заявитель ФГБОУ ВО «СамГТУ». EDN MWNXQI.

[4] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026669048 Российская Федерация. Определение мощности внутреннего источника тепла по температурному отклику : заявл. 18.06.2026 : опубл. 09.07.2026 / ***К. В. Колотилкина***, Е. В. Стефанюк ; заявитель ФГБОУ ВО «СамГТУ». EDN KKTMEG.

Список патентов

[1] Патент № 2835314 C1 Российская Федерация, МПК C01B 3/24, C01B 32/205. Опытно-промышленная установка для непрерывного получения водорода и графита путем пиролиза метана : заявл. 17.07.2024 : опубл. 24.02.2025 / И. В. Кудинов, С. В. Зайцев, ***К. В. Колотилкина*** [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО «СамГТУ». EDN ALCPBR.

[2] Патент № 2840120 C1 Российская Федерация, МПК C01B 3/24, C01B 3/26, C01B 32/05. Способ непрерывного получения водорода и графита путем пиролиза метана : заявл. 25.10.2024 : опубл. 19.05.2025 / И. В. Кудинов, С. В. Зайцев, ***К. В. Колотилкина*** [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО «СамГТУ». EDN YPEGNP.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.377.02,
созданного на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
(протокол № 9 от «13» ноября 2026 г.)

Заказ № ___. Формат 60x84 1/16 Усл. печ. л. 1.25. Тираж 100 экз.
Отпечатано в типографии Самарского государственного технического университета.
Отдел типографии и оперативной печати
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.