

На правах рукописи

ЖУКОВА Надежда Юрьевна

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ КРУПНЫХ ПОРИСТЫХ ЧАСТИЦ
ОРГАНИЧЕСКОГО ТОПЛИВА**

05.13.18 – математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Жукова

Москва – 2006

Работа выполнена на кафедре «Прикладная математика и информатика» Московского государственного индустриального университета филиала в г. Сергиев Посад.

Научный руководитель:

к.ф.-м.н., доцент Майков И.Л.

Од

Вед

Жукова Н.Ю.
Математическое
моделирование процессов
термического разложения
крупных пористых частиц 0...
2006 0-00

У1751337

профессор Страхов В.Л.

доцент Филипенко А.А.

льное государственное унитарное
иятие федеральный научно-
одственный центр «НИИ Приклад-
ии» (ФГУП «ФНПЦ «НИИПХ»)

У 1751337

ов на заседании
осударственном
105005, Москва,

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ

обозначенного здесь срока

е Мо
мана

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1751337

Жукова Н.Ю. Математическое

Волков И.К.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Процессы пиролиза (термической деструкции) различных органических веществ лежат в основе многих технологических процессов (получение активированного угля и т.д.). Кроме того, процессы пиролиза сопутствуют горению и газификации природных твердых топлив (уголь и т.д.).

Пиролиз органических веществ представляет собой сложный физико-химический процесс, при котором в результате нагрева из твердого топлива происходит выделение летучих веществ в виде газообразных и жидких продуктов: углеводородов, смол, кислот и т.д. Общее количество и состав вышедших летучих веществ зависят от условий, в которых осуществляется процесс деструкции – скорости нагрева частиц, максимальной температуры и т.д.

В настоящее время имеется большое количество работ, посвященных математическому моделированию процессов термического разложения органических веществ, в первую очередь углей. Характерной особенностью моделей является их применимость к достаточно мелким частицам (50 – 100 мкм) без учета структурных изменений в процессе пиролиза.

Наряду с этим существует широкий класс задач, связанных с процессами пиролиза органического топлива, и требуются новые подходы и модели для описания пиролиза крупных частиц, размеры которых составляют несколько сантиметров. Таким образом, актуальность работы определяется важностью разработки и созданием достаточно простых и надежных алгоритмов и машинных программ для численного моделирования процессов пиролиза (термического разложения) органического топлива и использования их при решении проблем комплексной переработки растительной биомассы в ценные продукты медицинского и технического назначения, а также при совершенствовании существующих и проектировании новых реакторов для переработки органических топлив.

В связи с этим целью работы является разработка математических моделей и численных методов решения дифференциальных уравнений и создание вычислительных программ, моделирующих процессы конвективного теплообмена в пористой среде и пиролиза крупных частиц органического топлива с учетом изменений структуры в ходе процесса.

Научная новизна:

1. Разработана математическая модель конвективного теплообмена в слое пористой среды;
2. Разработана математическая модель (одноканальная и многоканальная) процесса термической деструкции пористой частицы, применимая к крупным частицам;
3. Разработана математическая модель пористой структуры частицы;

4. Получено аналитическое решение нестационарного уравнения теплопроводности в приближении крупной частицы;
5. Созданы программы расчета процессов тепломассообмена при термической деструкции крупных частиц органического топлива, разработаны библиотеки компонентов для визуализации результатов.

Практическая ценность. Теоретическая и практическая значимость результатов исследования заключается в том, что содержащиеся в нем положения и выводы могут быть использованы:

- при решении проблем переработки растительной биомассы в ценные продукты медицинского и технического назначения;
- при совершенствовании существующих и проектировании новых реакторов для переработки органических топлив.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Математическая модель конвективного течения в слое пористой среды;
2. Математическая модель (одноканальная и многоканальная) реагирования частицы и ее структуры;
3. Численная модель и программа расчета пиролиза крупных частиц с учетом пористости.

Апробация работы.

Диссертация подготовлена, обсуждена и одобрена на кафедре прикладной математики и информатики филиала Московского государственного индустриального университета в г. Сергиев Посад.

Материалы диссертации были доложены на конференции, посвященной проблемам тепловой конвекции (International Conference ADVANCED PROBLEMS IN THERMAL CONVECTION г. Пермь, 2003 г.).

По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ.

Публикации. Основные результаты работы отражены в 4-х научных статьях [3-6] и 2-х тезисах докладов [1-2].

Личный вклад соискателя. Все исследования, изложенные в диссертационной работе, проведены лично соискателем в процессе научной деятельности.

Структура и объем работы.

Структура диссертации определяется логикой поставленных задач и состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы (83 источника). Диссертация изложена на 110 страницах печатного текста, содержит 5 таблиц, 39 рисунков, приложение на 25 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы, ставятся цель и задачи исследования, излагается степень научной разработанности темы, определяется теоретическая и практическая значимость работы, формулируются основные положения, выносимые на защиту, содержатся сведения об апробации результатов диссертационного исследования.

Глава 1 диссертации посвящена теоретико-методологическому анализу исследуемой проблемы.

Математические модели и системы дифференциальных уравнений представлены в главе 2.

Глава 3 посвящена численным методам решения систем дифференциальных уравнений.

В главе 4 проведено детальное тестирование программы с привлечением опубликованных экспериментальных данных.

В **заключении** автор подводит итоги диссертационного исследования, отражает основные положения диссертации.

1. Математическая модель конвективного теплопереноса в слое пористой среды

Рассмотрим слой пористой среды, ограниченный твердыми цилиндрическими поверхностями с радиусами R_1 и R_2 . Слой заполнен вязкой несжимаемой жидкостью с плотностью $\rho_{ж}$ и теплоемкостью $(c_p)_{ж}$. Границы цилиндрической полости поддерживаются при различных температурах; внутренняя имеет температуру T_1 , внешняя – $T_2 < T_1$.

Пористый материал слоя характеризуется коэффициентами пористости m и проницаемости K . Эти характеристики для различных сред изменяются в весьма широких пределах: $K \approx 10^{-8} \div 10^{-9} \text{ м}^2$, $m \approx 0.02 \div 0.90$.

Уравнение конвективной фильтрации жидкости в приближении Буссинеска, для модели Дарси, имеет вид

$$m \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -\frac{\nabla p}{\rho_*} - \frac{\nu}{K} \vec{V} + \vec{g} \beta \Delta T. \quad (1.1.)$$

К уравнению переноса импульса (1.1) следует добавить уравнения теплопроводности и непрерывности:

$$(\rho c_p)_{*} \frac{\partial T}{\partial t} = k_{*} \Delta T - (\rho c_p)_{*} \vec{V} \nabla T, \\ \operatorname{div} \vec{V} = 0.$$

В этом уравнении $(c_p)_{cp}$ и $(c_p)_{ж}$ – удельные теплоемкости пористой среды и жидкости соответственно, k_{cp} – коэффициент теплопроводности среды.

2. Одноканальная модель процесса термической деструкции пористой частицы

Рассмотрим одиночную частицу органического топлива (например, частицу древесины) радиуса R_p , состоящую из углеродного остатка и летучих веществ (рис. 2.1). Тогда масса частицы выражается равенством

$$m_p = m_c + m_s = m_p(1 - V^*) + m_p V^*, \quad (2.1)$$

где m_p – масса частицы, m_c – масса углеродного остатка, m_s – масса летучих веществ, V^* – начальная доля летучих веществ в частице.

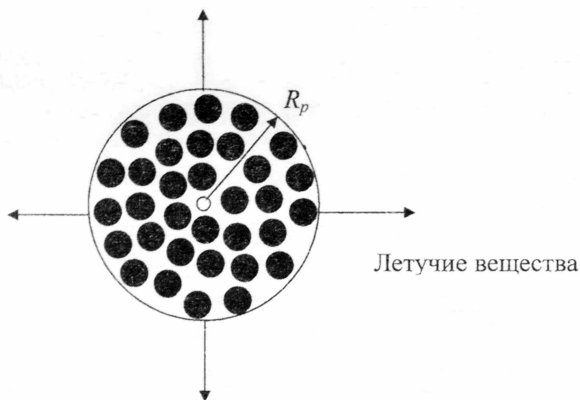


Рис. 2.1. Схема выхода летучих веществ

Под действием нагрева летучие вещества переходят из твердой фазы в газообразную и далее диффундируют по порам частицы в окружающую среду.

Процессы пиролиза можно представить в виде глобальной реакции:

Органическое топливо → Углеродный остаток + Летучие вещества

Для моделирования процесса термической деструкции используем одноканальную модель:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = k(V^* - V), \quad (2.2)$$

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E}{R_g T}\right), \quad (2.3)$$

где V – количество летучих веществ, k – константа скорости, k_0 – предэкспоненциальный множитель, E – энергия активации, T – температура частицы, R_g – газовая постоянная.

Уравнение (2.2) можно записать через C_s – концентрацию летучих веществ в угольной частице в твердой фазе в виде:

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = -k_0 \exp\left(-\frac{E}{R_g T}\right) C_s. \quad (2.4)$$

Уравнение неразрывности для вышедших летучих веществ C_{np} в объеме частицы имеет вид в сферической системе координат:

$$\frac{\partial C_{np}}{\partial t} = \frac{1}{mr^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(Dr^2 \frac{\partial C_{np}}{\partial r} \right) + S, \quad (2.5)$$

где m – пористость, $S = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \cdot C_{\text{л}}$ – источниковый член, D – коэффициент диффузии летучих веществ в порах.

Уравнение энергии имеет вид

$$\frac{\partial \rho c T}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial \rho c u T r^2}{\partial r} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (2.6)$$

где ρ , λ – плотность и коэффициент теплопроводности частицы, c – теплоемкость летучих веществ.

Движение летучих веществ происходит по закону Дарси:

$$u = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial P}{\partial r},$$

где K – коэффициент проницаемости, μ – динамическая вязкость летучих веществ, P – давление.

$$P = \frac{C_{np} R_g T}{M_g}, \text{ где } M_g \text{ – молекулярная масса летучих веществ.}$$

Изменение пористости частицы за счет выхода летучих веществ описывается уравнением:

$$m = 1 - (1 - V^*)(1 - m_0) - \frac{C_a}{\rho}, \quad (2.7)$$

где m_0 – пористость частицы в начальный момент времени.

Система дифференциальных уравнений (2.4) – (2.6) дополняется начальными

$$C_a(t=0) = C_a^0 = \frac{M_a}{Vr}, \quad C_{np}(t=0) = C_{np}^0, \quad T(t=0) = T_0, \quad (2.8)$$

и граничными условиями

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial C_{np}}{\partial r} \Big|_{(r=0)} &= 0; \quad \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{(r=0)} = 0, \\ D \frac{\partial C_{np}}{\partial r} \Big|_{(r=R_p)} &= h_m (C_{окр} - C_{np}), \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{(r=R_p)} &= h (T_{окр} - T), \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

где $T_{окр}$ и $C_{окр}$ – температура окружающей среды и концентрация летучих веществ в окружающей среде, h_m – коэффициент внешнего массообмена, h – коэффициент внешнего теплообмена.

3. Аналитическое решение нестационарного одномерного уравнения теплопроводности

Процесс термической деструкции пористой частицы может быть описан моделью, где определяющим фактором является время прогрева частицы. Уравнение неразрывности для летучих веществ имеет вид

$$\frac{d(C_{a_0} V_c)}{dt} = -k C_{a_0} V_c, \quad (3.1)$$

где C_{a_0} – начальная концентрация летучих в частице,

$V_c = (4/3)\pi r_c^3$ – объем непрогретой частицы.

Из уравнения (3.1) получаем:

$$\frac{dr_c}{dt} = -k_0 (r_c / 3) \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (3.2)$$

где T – температура частицы, r_c – положение фронта прогрева.

Уравнение энергии имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\alpha}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (3.3)$$

где $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$.

Движение фронта температур может быть получено решением дифференциального уравнения (3.2) вместе с уравнением (3.3). Эти уравнения могут быть решены итерационно, получая T и r_c на каждом временном шаге.

Температура может быть получена из аналитического решения уравнения (3.3).

Уравнение для температуры в имеет вид

$$T(r, t) = T_{окр} - 2(T_{окр} - T_0) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(\sin \beta_n - \beta_n \cos \beta_n)}{\beta_n - \sin \beta_n \cos \beta_n} \cdot \frac{R}{r} \cdot \frac{\sin(\beta_n r / R)}{\beta_n} e^{-\beta_n^2 \alpha / R^2}.$$

4. Многоканальная модель процесса термической деструкции пористой частицы

Процесс термической деструкции может протекать по нескольким (например, двум) параллельным каналам.

Двухканальная модель может быть описана с помощью следующей системы уравнений

$$\frac{\partial C_{a1}}{\partial t} = -k_0 \exp\left(-\frac{E_1}{R_g T}\right) C_{a1}, \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial C_{a2}}{\partial t} = -k_0 \exp\left(-\frac{E_2}{R_g T}\right) C_{a2}. \quad (4.2)$$

Тогда уравнение неразрывности для вышедших летучих C_{np} в объеме частицы для двухканальной модели, будет иметь вид

$$\frac{\partial C_{np}}{\partial t} = \frac{D}{mr^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial C_{np}}{\partial r} \right) + k_1 C_{a1} + k_2 C_{a2}. \quad (4.3)$$

Систему уравнений для многоканальной (n – канальной) модели можно представить в следующем виде

$$\frac{\partial C_{ai}}{\partial t} = -k_0 \exp \left(-\frac{E_i}{R_g T} \right) C_{ai}, \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial C_{np}}{\partial t} = \frac{D}{mr^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial C_{np}}{\partial r} \right) + \sum_{i=1}^n k_i C_{ai}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (4.5)$$

5. Результаты расчётов

5.1. Одноканальная модель разложения частицы

При расчетах использовались следующие значения констант:

начальное содержание летучих веществ – $V^* = 0,65$,

пористость древесины – $m = 0,6$,

энергия активации – $E = 93670$ (Дж/моль),

плотность древесины – $\rho_s = 600$ (кг/м³),

начальная температура частиц задавалась равной 273 К, а температура окружающей среды – 773 К.

$$h_m = \frac{Nu \cdot D_{окр}}{2R_p} = 0.01, \quad h = \frac{Nu \cdot \lambda_{окр}}{2R_p} = 0.24, \quad Nu = 2 + Re^{2/3} \cdot Pr^{1/3} > 2.$$

С помощью разработанной программы, моделирующей процессы пиролиза крупных частиц органического топлива, визуально отображается фронт нагрева частицы и динамика процесса пиролиза (рис. 5.1). Нагрев происходит от краев частицы к ее центру, из чего следует, что края частицы нагреваются сильнее, в результате чего осуществляется выход летучих и в конце процесса остается лишь углеродный остаток.

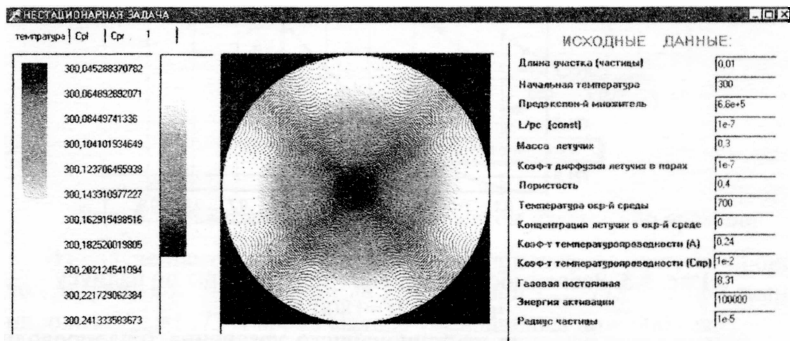


Рис. 5.1. Фронт нагрева частицы и динамика процесса пиролиза

На рис. 5.2 и рис. 5.3 представлена зависимость изменения температуры по радиусу при пиролизе частицы в течение 30 и 1800 секунд.

При увеличении радиуса частицы растет температура прогрева частицы.

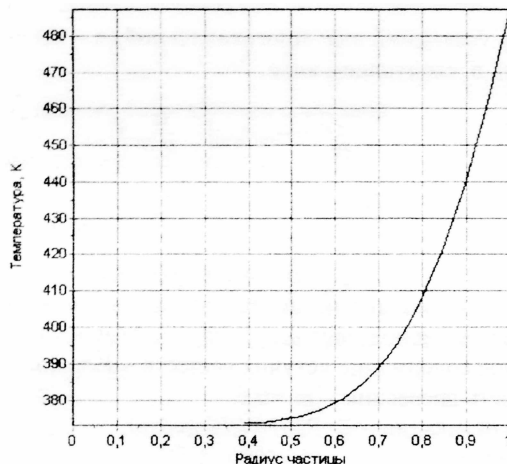


Рис. 5.2. Зависимость изменения температуры по радиусу частицы ($t = 30$ сек)

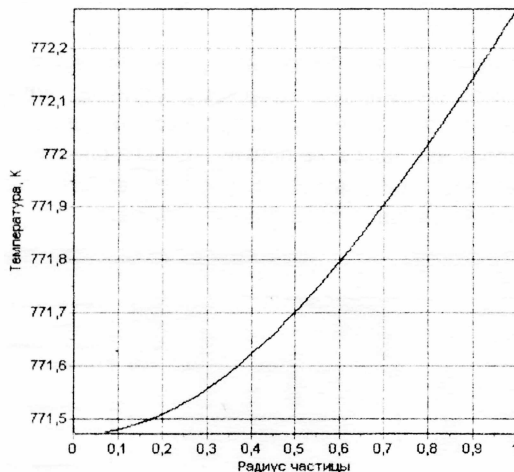


Рис. 5.3. Зависимость изменения температуры по радиусу частицы ($t = 1800$ сек)

Аналитическое решение нестационарного уравнения теплопроводности в приближении мгновенного прогрева частицы графически представлено на рис. 5.4.

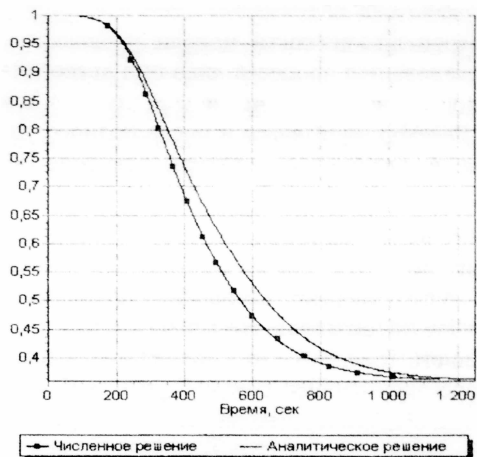


Рис. 5.4. Выход летучих веществ по времени

Изменение массы частицы за счет выхода летучих представлено на рис. 5.5.

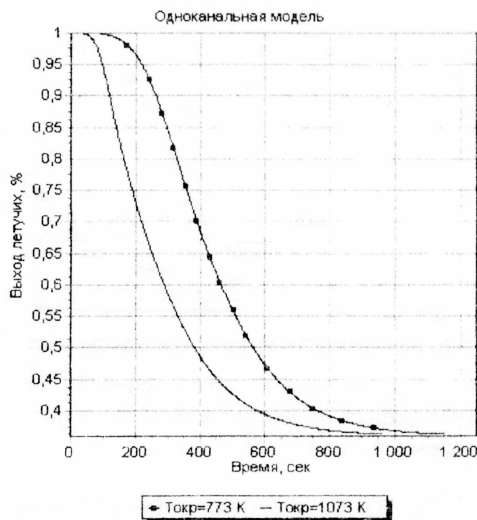


Рис. 5.5. Зависимость изменения массы частицы во времени

Из полученного результата видно, что при нагреве частицы происходит выход летучих в полном объеме за 1200 сек при $T_{окр}=773$ К, а при температуре пиролиза $T_{окр}=1073$ К время выхода уменьшилось до ≈ 900 сек.

5.2. Многоканальная модель разложения частицы

Для проверки адекватности модели привлекались экспериментальные данные по исследованию процесса пиролиза древесины. Исходная древесина помещалась в обогреваемый герметичный реактор, в который подавался подогретый газ. Реактор закрывался и после полного удаления воздуха осуществляли нагрев до заданной температуры в течение 1800 сек. Пиролиз проводился при различных температурах.

Выход летучих веществ происходит по четырем параллельным каналам в соотношении массы летучих веществ 0,345/0,272/0,256/0,122 с разной скоростью (рис. 5.6). Энергия активации принимается равной $E_1=936700$ (Дж/моль), $E_2=95670$ (Дж/моль), $E_3=87670$ (Дж/моль), $E_4=75670$ (Дж/моль)

Можем видеть (рис. 5.6), что количество вышедших летучих веществ при температуре окружающей среды $T_{окр}=1073$ К не изменилось по сравнению с $T_{окр}=773$ К, а время их выхода заметно сократилось.

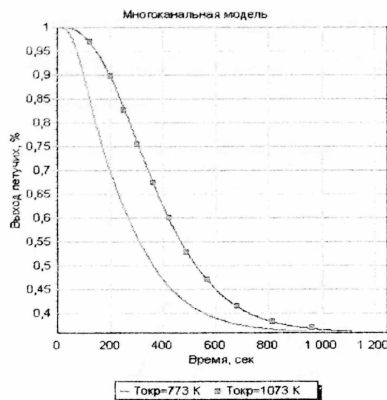


Рис. 5.6. Зависимость изменения массы частицы во времени

При нагреве древесины в первую очередь разложению подвергаются водорастворимые вещества. Затем распаду подвергаются жиры и смолы. Самое большое время распада имеет лигнин, что объясняется его термостабильностью.

Целлюлоза за данный временной интервал и при энергии активации равной $E_1=936700$ (Дж/моль) распаду практически не подвергается.

Зависимости выхода древесного угля от температуры пиролиза показаны на рис. 5.7. При расчетах использовались те же значения констант, что и в одноканальной модели. Температура частиц принималась равной 373 К. Начальное содержание летучих веществ принималось равным 0,65. Время пиролиза составляло 30 минут.

Сравнивая количественный состав компонентов древесины, следует отметить, что основными компонентами являются лигнин и целлюлоза. Их ко-

личественное содержание складывается на закономерностях образования древесного угля из древесины.

Как следует из рис. 5.7, выход древесного угля закономерно снижается с повышением температуры процесса и составляет при 773 К 35,6%. Эта величина заметно превышает выход угля из древесины березы и сосны – 24,9 и 27,8 % соответственно, что может быть обусловлено более высоким содержанием термостабильного компонента – лигнина.

По мере повышения конечной температуры обугливания весовой выход угля из абсолютно сухой древесины падает, причем в пределах от 473 К до 623 К очень быстро, а далее – очень медленно.

Сравнивая экспериментальные данные и результаты полученные расчетным путем, можно сказать, что разработанная модель не только качественно, но и количественно верно описывает процесс выхода угля. Данные полученные по одноканальной и многоканальной модели адекватно описывают эксперимент и кинетические константы влияют только на время выхода летучих веществ. Этот факт можно объяснить тем, что в многоканальной модели каждый компонент древесины имеет свою собственную энергию активации и скорость выхода, что более верно описывает процесс разложения древесины.

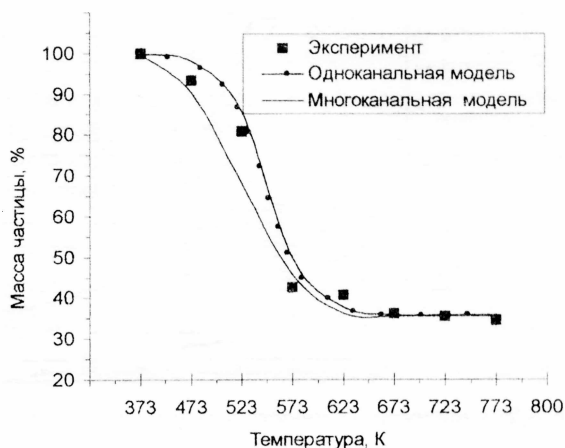


Рис. 5.7. Зависимости выхода древесного угля от температуры пиролиза

Время выхода летучих веществ (рис. 5.8) в интервале температур от 650 К до 850 К в количественном соотношении примерно одинаково для обеих моделей. В интервале температур от 530 К до 550 К время выхода существенно различается. Этот результат можно объяснить тем, что при низкой температуре прогрева частицы в многоканальной модели компоненты выходят по параллельным каналам каждый со своей собственной скоростью, и в результате чего время выхода увеличивается. При высокой температуре в

результате высокоскоростного пиролиза летучие с низкой энергией активации улетучиваются также быстро, как и в одноканальной модели.

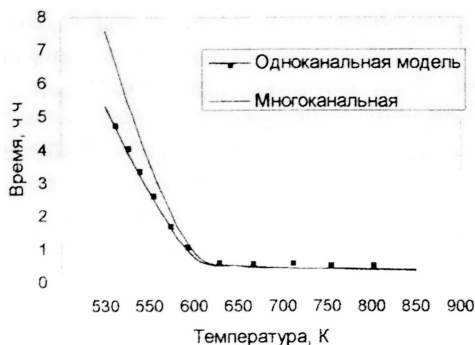


Рис. 5.8. Зависимость времени выхода летучих веществ от температуры пиролиза

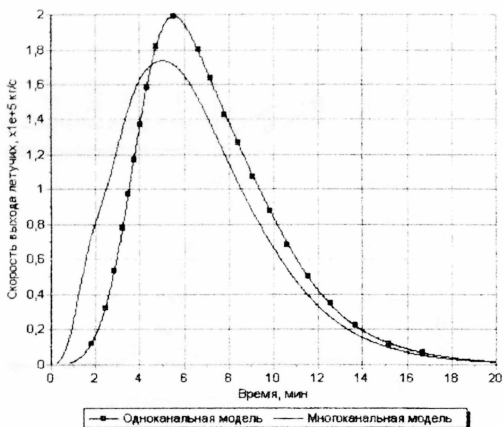


Рис. 5.9. Зависимость скорости выхода летучих веществ во времени

На рис. 5.9 представлена скорость выхода летучих веществ во времени для двух моделей при температуре окружающей среды равной 773 K и радиусом частицы равным 10 мм. Эти зависимости существенно отличаются. Выход летучих веществ для многоканальной модели осуществляется с меньшей скоростью и за больший промежуток времени, чем в одноканальной модели.

5.3. Математическая модель конвективного тепло-массопереноса в слое пористой среды

Для расчётов использовался ПК следующей конфигурации:

- процессор AMD Duron(tm) 900 MHz;
- видеокарта AGP 32 M6 SDRAM GeForce2 MX 100/200 Ver. 4.0

•память DDR 256 Мб.

Проведён анализ полученных результатов при варьировании количества точек разбиения и выявлено, что рациональное разбиение сетки составляет 50×50 (см. рис. 5.10, 5.11).

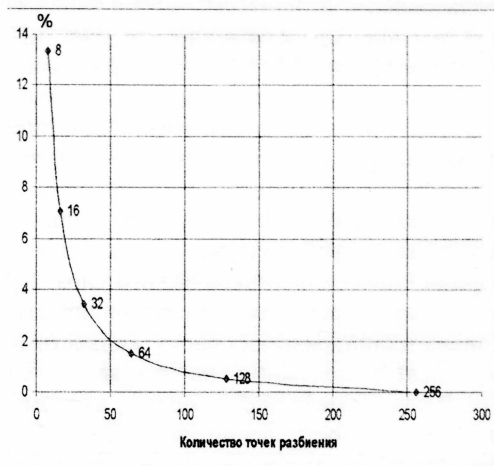


Рис. 5.10. Значение относительной погрешности, %

Как было показано выше, на точность расчёта влияет количество точек разбиения расчётной области, чем больше точек, тем точнее полученные значения, но увеличение узлов расчётной сетки увеличивает процессорное время, затрачиваемое на расчёт.

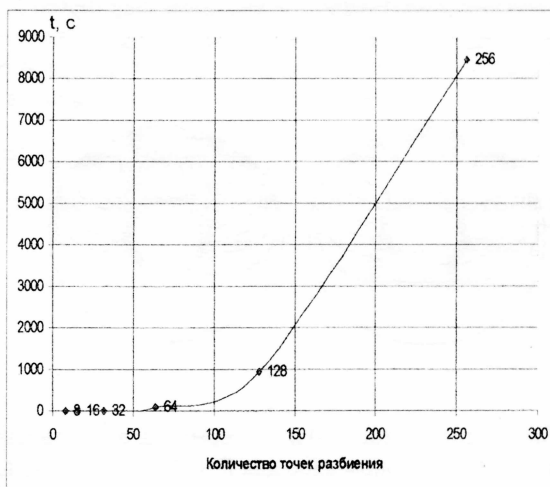


Рис. 5.11. Время счета, с

На рис. 5.12 изображены структуры течений, рассчитанные в модели конвективного теплопереноса в слое пористой среды при $R=0.3$, $Gr=400$, $Pr=1$, $Da=10^{-6}$. Из рис. 5.12 следует, что при данных значениях параметров возможны как симметричные относительно плоскости $\theta = 0$, так и несимметричные движения.

Симметричное течение, представленное на рис. 5.12 а, состоящее из двух серповидных вихрей (далее $S1$), возникает при сколь угодно малых значениях числа Грасгофа и существует в широком диапазоне значений параметров задачи. С увеличением числа Грасгофа над внутренним цилиндром образуется конвективный факел, а вблизи границ полости формируются пограничные слои.

Другое симметричное движение ($S2$), изображенное на рис. 5.12 б, помимо двух серповидных вихрей содержит дополнительные конвективные ячейки в приполярной области цилиндрического слоя. Причиной образования этих дополнительных вихрей является неустойчивость релеевского типа: в относительно тонких цилиндрических слоях жидкости тепловые условия в верхней части становятся похожими на таковые в плоском слое, подогреваемом снизу. В слоях умеренной толщины, например с $R=0.3$, существует только одно симметричное решение такого вида с двумя дополнительными вихрями.

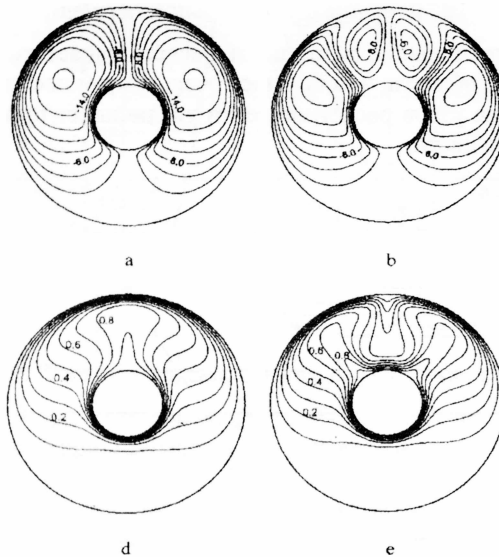


Рис. 5.12. Линии тока (а, б, с) и изотермы (д, е, ф) конвективного движения в цилиндрическом слое для $R=0.3$, $Gr=400$, $Pr=1$, $Da=10^{-6}$

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ПРОДЕЛАННОЙ РАБОТЕ

1. Разработана двумерная нестационарная модель конвективного тепло-массопереноса в горизонтальном цилиндрическом реакторе и эффективный численный метод (сдвинутые сетки) ее расчета. Рассмотрена структура конвективного движения и характер теплопередачи в горизонтальном цилиндрическом слое. Проведён анализ полученных результатов при варьировании количества точек разбиения и выявлено, что оптимальное разбиение сетки составляет 50×50 .

2. Разработана математическая модель (одноканальная и многоканальная) процесса термической деструкции пористой частицы. Одноканальная модель основана на однокомпонентной схеме. Многоканальная модель основана на представлении органической массы древесины в виде совокупности функциональных групп, где выход групп происходит параллельно и независимо друг от друга, что приводит к увеличению времени процесса термической деструкции.

3. Разработана программа расчёта, позволяющая рассчитывать фронт нагрева крупной частицы и динамику процесса пиролиза

4. Получено аналитическое решение нестационарного уравнения теплопроводности в приближении крупных частиц.

5. Проведено сравнение с экспериментальными данными. Показано, что разработанная модель не только качественно, но и количественно верно описывает процесс пиролиза органической массы топлива. Данные, полученные по одноканальной и многоканальной моделям адекватно описывают эксперимент, кинетические константы влияют только на время выхода летучих веществ.

6. Получены зависимости скорости выхода летучих веществ от времени процесса для различных радиусов частицы. Показано, что выход летучих веществ при исследовании многоканальной модели осуществляется с меньшей скоростью и за больший промежуток времени, что связано с разделением по времени выхода различных компонентов.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В РАБОТАХ

1. Jukova N.Y., Maikov I.L., Sidorov D.A. Numerical and analytical study of particle pyrolysis processes // Advanced problems in thermal convection: Abstracts International Conference. – Perm (Russia), 2003. – P. 115–116.
2. Jukova N.Y., Maikov I.L., Sidorov D.A. Two-dimensional model of simulation of heat and mass transfer processes in porous media // Advanced problems in thermal convection: Abstracts International Conference. – Perm (Russia), 2003. – P. 117–118.
3. Jukova N.Y., Maikov I.L., Sidorov D.A. Numerical and analytical research of heat and mass exchange at the thermal destructive process of a single particle of organic fuel // Advanced problems in thermal convection: Proceedings International Conference. – Perm (Russia), 24-27 November 2003. – Perm, 2004. – P. 376–380.
4. Jukova N.Y., Maikov I.L., Sidorov D.A. Two-dimensional model of simulation of heat and mass transfer processes in porous media // Advanced problems in thermal convection: Proceedings International Conference. – Perm (Russia), 24-27 November 2003. – Perm, 2004. – P. 381–383.
5. Жукова Н.Ю., Сидоров Д.А. Математическое моделирование конвективного течения в горизонтальном цилиндрическом слое насыщенной пористой среды // Научные труды Балтийской Академии информатизации / Гл. ред. В.А. Сурков (Рига), 2005. – Вып. 3. – С. 70–75.
6. Жукова Н.Ю., Сидоров Д.А. Математическое моделирование процессов гидродинамики и химической кинетики на основе принципов объектно-ориентированного программирования // Право, общество, власть и современность: Тезисы докладов и выступлений студентов, аспирантов и преподавателей ГОУ МГИУ / Ответственный редактор А.А. Гончаров. – М., 2005. – С. 238–252.

Подписано в печать 12.04.2006г. Заказ №711
Объем 1,0 п.л. Тираж 100 экз.

Типография ООО "ВДВ-ПАК"