

44. Кляппель М., Хайрих Г. Физика и технология усиленных эластомеров: от молекулярных механизмов к применению в промышленности // Мир шин. – 2005. – № 12. – С. 22; Kautsch. Gummi, Kunststoffe. 2005. Bd.58. № 5. – С. 217-224.

45. Гамлицкий Ю.А., Швачич М.В. Методы описания напряженно-деформированного состояния и прогнозирования поведения в эксплуатации шин // Проблемы шин и резинокордных композитов. – 2005. – № 4. – С. 51.

46. Ильина Е.А., Гамлицкий Ю.А., Масагутова Л.В., Микуленко Н.А. Оптимизация состава и калибра гермослоя с учетом влияния внутриоболочечного давления на работоспособность деталей шин. Сообщение 1. Основные принципы // Каучук и резина. – 2002. – № 5. – С. 30.

47. Ильина Е.А., Гамлицкий Ю.А., Масагутова Л.В., Микуленко Н.А. Оптимизация состава и калибра гермослоя с учетом влияния внутри-оболочечного давления на работоспособность деталей шин. Сообщение 3. О влиянии внутриоболочечного давления на прогнозирование работоспособности // Каучук и резина. – 2003. – № 5. – С. 39.

48. Хайретдинов М.Г. Динамические термозластопласты «кварта» // Химия и бизнес. – 2006. – № 7-8. – С. 26.

49. Межуев С.В. Разработка технологии и организация производства полимерных композиционных материалов на основе нанокompозитов с повышенным в 1,5-2 раза сроком эксплуатации // Российские нанотехнологии. – 2007. – Т. 2. – № 1-2. – С. 41.

50. Веселов И.В., Любартович С.А. Литые технологии в шинной промышленности // Каучук и резина. – 2008. – № 5. – С. 27-35.

НИКИТИН Юрий Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Химическая технология органических веществ» нефтехимического института Омского государственного технического университета.

АНИКЕЕВА Ирина Валерьяновна, научный сотрудник лаборатории физико-химических свойств углеродных материалов Института проблем переработки углеводородов СО РАН.

АНИКЕЕВ Валерьян Николаевич, кандидат технических наук, ведущий технолог лаборатории физико-химических свойств углеродных материалов Института проблем переработки углеводородов СО РАН.

E-mail: yurunikitin@yandex.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 04.05.2009 г.

© Никитин Ю.Н., Аникеева И.В., Аникеев В.Н.

УДК 66.011.665.6

**Н. Д. ДЕМИДЕНКО
Л. В. КУЛАГИНА**

Институт вычислительного
моделирования СО РАН
Сибирский федеральный
университет, г. Красноярск

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ В ТРУБЧАТЫХ ПЕЧАХ

Предложена математическая модель стационарных и динамических режимов технологических печей как объектов с распределенными параметрами. Исследованы статические и переходные характеристики промышленных печей. Сформулированы соответствующие краевые задачи.

Ключевые слова: математическое моделирование, системы управления с распределенными параметрами, теплообмен.

Использование органического жидкого топлива является основным источником энергии большого числа различных теплотехнологических процессов. Проблема энергоэффективности существующих производств приводит к необходимости решения задач совершенствования теплофизических и гидродинамических процессов при сжигании жидкого топлива в топочных устройствах. В большинстве случаев экономичность сжигания и снижение количества вредных выбросов, поступающих в окружающую среду, зависит от дисперсности топлива, подаваемо-

го в зону горения, времени нахождения его в реакционном объеме, гетерогенности состава топлива, конструктивных особенностей топочного устройства и технологических параметров процесса, проводимого в данном устройстве [1, 2].

Горение жидкого топлива всегда протекает в паровой фазе, испарение обеспечивается подводом тепла из зоны горения его паров. Крайним случаем горения капель является диффузионное горение, когда скорость сгорания паров очень велика по отношению к скорости диффузии паров и окислителя в зоне

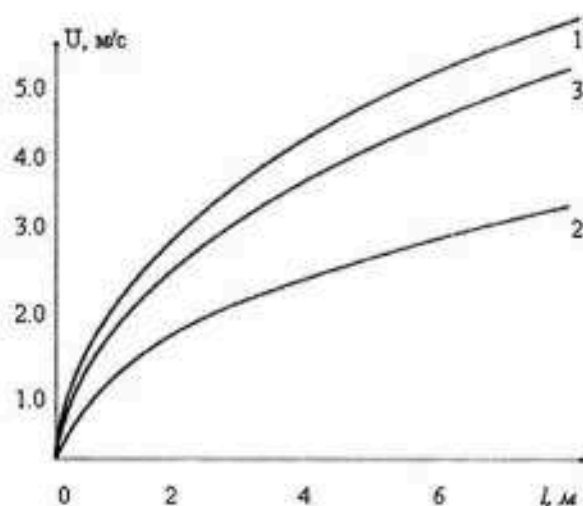


Рис. 1. График изменения скорости горения смеси по длине печи: 1 – диаметр капли 1 мм, 2 – 2 мм, 3 – меньше 1 мм

горения, толщина которой становится исчезающе малой. К такому режиму может приближаться горение сравнительно крупных капель.

В целях упрощения модель горения капли жидкого топлива получена при следующих предположениях [2]:

- капля имеет сферическую форму;
- влиянием конвекции пренебрегают, пламя рассматривают как сферическую поверхность, concentрическую с каплей;

- пламя считают разновидностью диффузионного пламени, которое образуется в результате реакции между парами горючего и воздухом, которые реагируют в стехиометрическом соотношении;

- рассматривают стационарное состояние при постоянном диаметре капли, хотя реально диаметр жидкой капли уменьшается по мере горения, однако это изменение происходит медленно по сравнению с изменением скорости диффузии и прочими факторами;

- температура капли одинакова по всему объему;

- давление в течение всего процесса горения считается постоянным;

- влияние излучения рассматривают отдельно.

В качестве объекта исследования выбрана трубчатая печь, широко распространенная в нефтехимических производствах [1]. Исходя из законов механики сплошных сред, можно составить модель нестационарного горения, представленную следующим уравнениями:

1. Уравнение непрерывности (сохранения массы)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial l} = 0, \quad (1)$$

где t, l – независимые переменные, ρ – массовая плотность смеси, u – скорость движения смеси. Если иметь в виду покомпонентную модель процесса горения в камере печи, то уравнение (1) можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial(\rho x)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho x u)}{\partial l} = -\frac{\rho x}{\tau}, \quad (2)$$

где x – концентрация горючего вещества в смеси ($0 \leq x \leq 1$), τ – время сгорания, которое зависит от температуры в смеси.

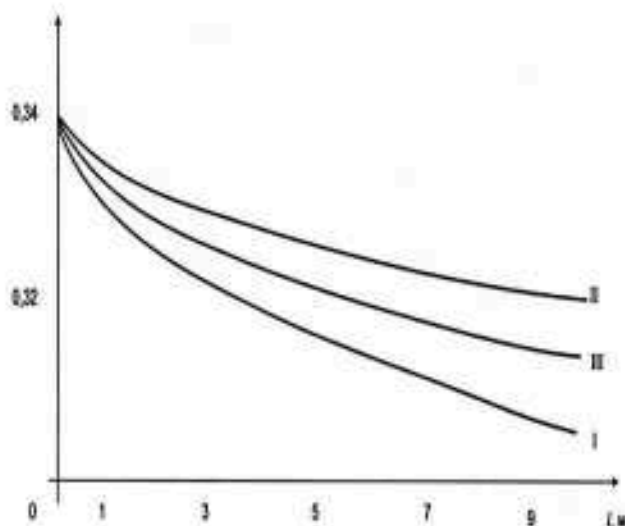


Рис. 2. График изменения концентрации горючего вещества по длине печи: I – горение каплей диаметром 1 мм, 2 – 2 мм, 3 – горение каплей диаметром меньше 1 мм

Если принять ρ_x – плотность жидкости в капле, то масса капли:

$$m = \rho_x \Omega,$$

где $\Omega = \frac{4}{3} \pi a^3$ – объем капли, a – радиус капли.

Пусть n – концентрация капель в смеси, тогда

$$n m = \rho x, \quad n = \frac{\rho x}{m}.$$

2. Уравнение сохранения импульса. Это уравнение для одномерного процесса выглядит следующим образом:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial l} \right) + \frac{\partial p}{\partial l} = 0. \quad (3)$$

3. Уравнение сохранения энергии

$$\rho T \left(\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial l} \right) = \frac{\rho x}{\tau} - Q(T) + K_2 (T_c - T). \quad (4)$$

где q – теплота сгорания, $Q(T)$ – потери на излучение, S – энтропия, причем $S = C_p \ln \frac{p}{p_0}$, $\gamma = 1.0 - 1.4$, т. к. для жидкостей различие между C_p и C_v незначительно.

4. Уравнение теплообмена для сырья

$$\frac{\partial T_c}{\partial t} + w \frac{\partial T_c}{\partial l} = K_2 (T - T_c), \quad (5)$$

T_c – температура сырья; K_2 – соответствующий коэффициент теплопередачи.

5. Уравнение состояния

$$\frac{P}{\rho} = RT, \quad (6)$$

где R – газовая постоянная.

На основе этой модели сформулирована краевая задача и сделан ряд численных экспериментов для стационарных и динамических режимов горения топлива.

Дополним систему (1)-(6) начальными и граничными условиями:

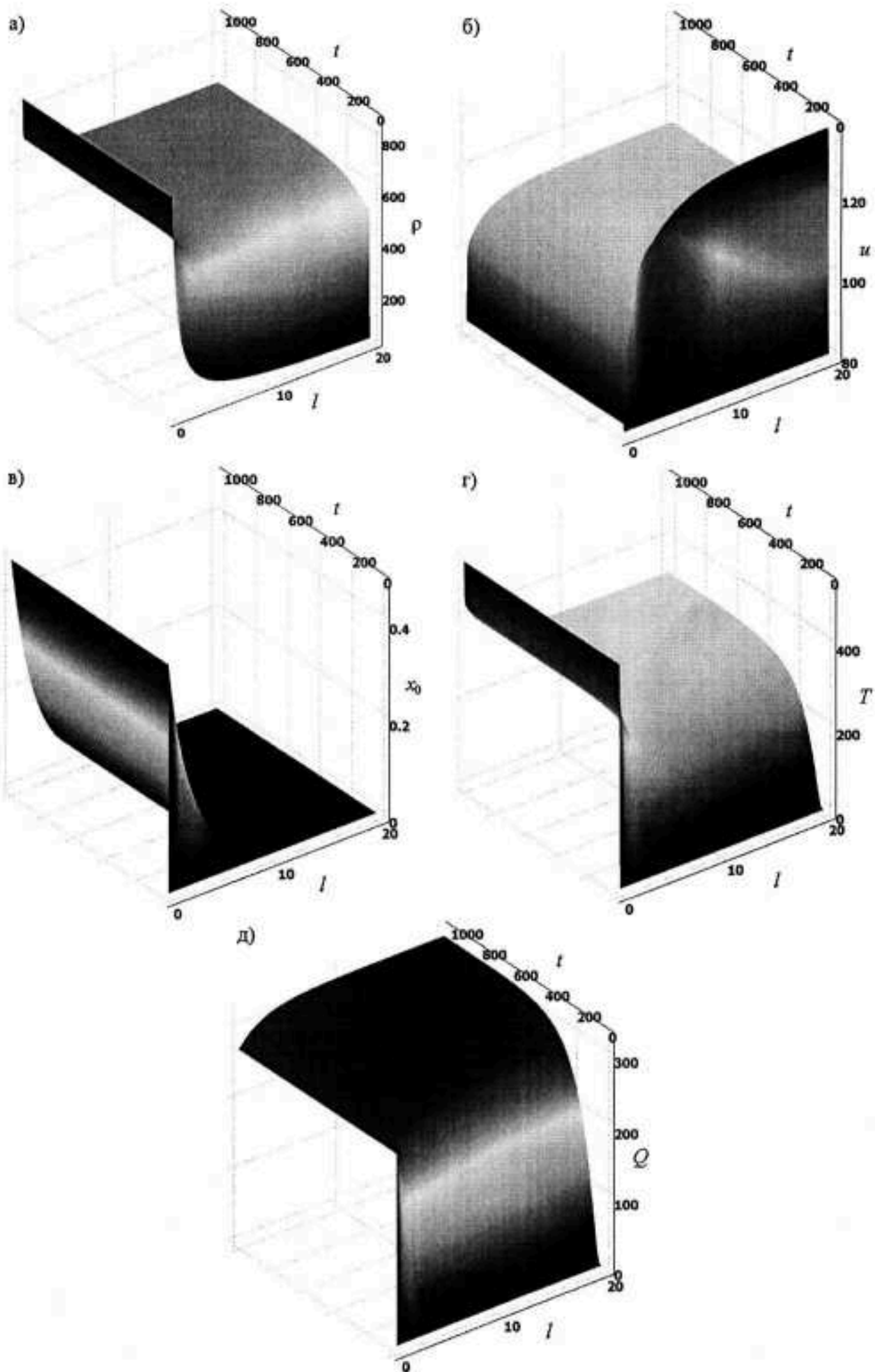


Рис. 3. Графики переходных процессов для плотности (а), скорости (б), концентрации горячего вещества (в), температуры факела (г), температуры сырья (д)

$$\rho(l,0) = \varphi_1(l), \quad x(l,0) = \varphi_2(l), \\ u(l,0) = \varphi_3(l), \quad T(l,0) = \varphi_4(l), \quad T_c(l,0) = \varphi_5(l) \quad (7)$$

$$\rho(0,t) = \psi_1(t), \quad x(0,t) = \psi_2(t), \\ u(0,t) = \psi_3(t), \quad T(0,t) = \psi_4(t), \quad T_c(L,t) = \psi_5(t) \quad (8)$$

Здесь температура сырья задается в точке $l=L$, так как сырье подается сверху в печь и, таким образом, имеем противоточный технологический процесс.

В случае стационарной модели процесса горения уравнения (1)-(6) могут быть значительно упрощены. При этом $\frac{\partial}{\partial t} = 0$ (первое слагаемое в левых частях уравнений (1)-(5)) и $\frac{\partial}{\partial l} = \frac{d}{dl}$, так как остается лишь одна независимая переменная. Уравнение (1) может быть проинтегрировано, что приводит к простой форме уравнения неразрывности:

$$\rho u = M - \text{const}, \\ \frac{d}{dl}(\rho u x) = -\frac{\rho u}{\tau} \quad (9)$$

Уравнение сохранения количества движения может быть преобразовано в интегральную форму для случая плоского установившегося одномерного течения:

$$\rho u \frac{du}{dl} + \frac{dP}{dl} = 0,$$

которое имеет интеграл:

$$\rho u^2 + P = \Pi, \quad \text{где } \Pi = \text{const}.$$

Тогда уравнение сохранения энергии представим в виде (без учета теплопередачи с сырьем):

$$C_p \rho T_n u \frac{d \ln \frac{P}{\rho^\gamma}}{dl} = \frac{\rho x}{\tau} - Q(T_n).$$

Перепишем систему, полученную с учетом первого уравнения этой системы:

$$\frac{dx}{dl} = -\frac{x}{u\tau}, \\ Mu + P = \Pi, \\ \frac{d}{dl} \left[\frac{u^2}{2} + \frac{\gamma u P}{M(\gamma-1)} \right] = \\ = \frac{R}{C_v(\gamma-1)\tau} \frac{x}{u} q - \frac{RQT_n}{C_v M(\gamma-1)}. \quad (10)$$

Система (10), состоящая из обыкновенных дифференциальных уравнений, теперь может быть решена относительно скорости движения смеси и концентрации горючего вещества в смеси по длине камеры сгорания. Это решение может быть использовано для получения других параметров печи, которые зависят от x и u .

Для определения x и u как функций длины в камере сгорания можно сформулировать задачу Коши, задавая значения x и u на входе в камеру сгорания:

$$\frac{dx}{dl} = -\frac{x}{u\tau},$$

$$\frac{du}{dl} = \frac{R}{C_v} \left[\frac{Mqx - \tau u QT}{u\tau(\gamma P - Mu)} \right],$$

$$0 \leq l \leq L,$$

$$x(0) = \alpha_1, \quad u(0) = \alpha_2.$$

Для решения системы дифференциальных уравнений применим программу пошагового интегрирования, выполненного методом Кутты-Мерсона.

Проведены расчеты горения капель различного диаметра для задачи Коши с начальными условиями:

$$x(0) = 0,346, \quad u(0) = 1,0 \text{ м/с}.$$

Капли с диаметром 0,01 мм имеют время сгорания $\tau = 0,00011$ с и потери на излучение $Q = 0,00001498$ Дж/с; с диаметром 0,1 мм – $\tau = 0,011$ с и $Q = 0,001498$ Дж/с; с диаметром 1 мм – $\tau = 0,7$ с и, соответственно, потери на излучение $Q = 0,1498$ Дж/с; с диаметром 2 мм – время сгорания $\tau = 2,3$ с и $Q = 0,27818$ Дж/с. В задаче использовались и постоянные величины: давление – $P = 101000$ Па, теплота сгорания – $q = 26000000$ Дж/кг (с учетом диссоциации продуктов сгорания), массовый расход – $M = 144$ кг, $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = 1,1$. На рис. 1, 2 представлены результаты расчетов.

Результаты проведенных расчетов показывают, что скорость горения и концентрация горючего вещества по длине печи, как и потерянное излучение, существенно зависят от размеров капель топлива. Наилучшие параметры горения имеют капли диаметром 1 мм, причем по скорости горения для этих капель наблюдается локальный максимум.

На рис. 3 приведены результаты расчетов динамических характеристик технологического процесса в трубчатой печи.

Библиографический список

1. Балабышко, А. М. Гидродинамическое диспергирование / А. М. Балабышко, А. И. Зимин, В. П. Ружицкий. – М.: Наука, 1998. – 331 с.
2. Демиденко, Н. Д. Управляемые распределенные системы / Н. Д. Демиденко. – Новосибирск: Наука, 1999. – 393 с.
3. Демиденко, Н. Д. Моделирование и оптимизация технических систем с распределенными параметрами / Н. Д. Демиденко, А. В. Кулагина – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. – 212 с.

ДЕМИДЕНКО Николай Данилович, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник ИВМ СО РАН.

КУЛАГИНА Людмила Владимировна, магистр техники и технологии, инженер кафедры «Гидропривод и гидропневмоавтоматика», Сибирский федеральный университет.

E-mail: klv_post@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 13.04.2009 г.
© Демиденко Н.Д., Кулагина А.В.