

УДК [665.63+662.764]:62.50

Численный метод исследования стационарных режимов в технологических печах

Н.Д. Демиденко^а, Л.В. Кулагина^{б*}

^аСКТБ «Наука» КНЦ СО РАН

Россия, 660049, Красноярск, пр. Мира, 53

^бСибирский федеральный университет,

Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

Received 18.11.2013, received in revised form 14.12.2013, accepted 12.01.2014

В статье предлагаются математические модели для стационарных и динамических процессов технологических печей как объектов с распределёнными параметрами. Эта математическая модель получена на основе законов сохранения энергии, массы и импульса и включает в себя дифференциальные уравнения в частных производных. Проведено численное исследование стационарных режимов трубчатых печей. Для этого сформулирована краевая задача для расчета концентрации горючего вещества, плотности, скорости, температуры дымовых газов и температуры нагреваемого сырья, идущего на разделение в ректификационную колонну. Представлены результаты расчета технологических параметров. Предложенный метод может быть использован при автоматизации ректификационных установок в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности.

Ключевые слова: математическое моделирование, системы с распределёнными параметрами, теплообмен, численный метод.

Для высокотемпературного нагрева нефти и нефтепродуктов в процессе их переработки в ректификационных установках применяют трубчатые печи. Печи работают следующим образом [1]: мазут и газ сжигают в горелках, расположенных в камере радиации. Продукты сгорания из камеры радиации поступают в камеру конвекции, затем направляются в газосборник и по дымовой трубе уходят в атмосферу. В камере конвекции расположены конвекционные трубы, воспринимающие тепло при соприкосновении дымовых газов с поверхностью нагрева путем конвекции. Нагреваемый продукт в печи последовательно проходит через конвекционные и радиантные трубы, поглощая тепло. Радиантная поверхность воспринимает большую часть тепла, выделяемого при сгорании топлива (рис. 1).

Горение жидкого топлива всегда протекает в паровой фазе, причем испарение обеспечивается подводом тепла из зоны горения паров. Топливо всегда сжигается в распыленном виде.

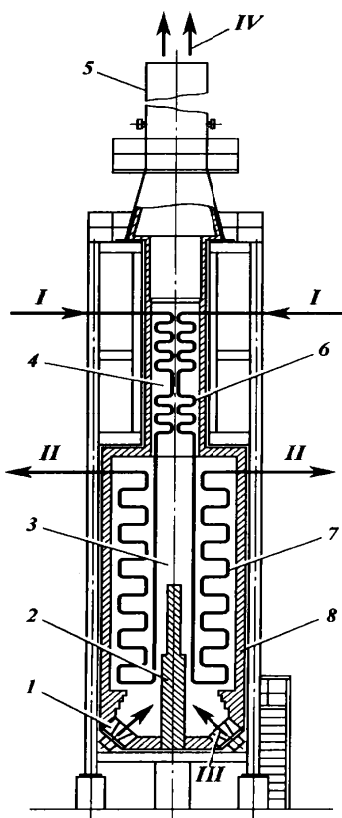


Рис. 1. Схема трубчатой печи: 1 – горелка; 2 – настильная стенка; 3 – камера радиации (топочная камера); 4 – камера конвекции; 5 – дымовая труба; 6 – змеевик конвекционных труб; 7 – змеевик радиантных труб; 8 – футеровка. Потоки: I – вход сырья; II – выход сырья; III – топливо и воздух; IV – дымовые газы

Крайним случаем горения капля является диффузионное горение, когда скорость сгорания паров очень велика по отношению к скорости диффузии паров и окислителя в зоне горения, толщина которой становится исчезающе малой. К такому режиму может приближаться горение сравнительно круглых капель. Диффузионная теория горения развита Г.А. Варшавским [2].

В математических методах анализа процесса горения имеются некоторые расхождения у разных авторов, но для стационарного сферического горения используется единый подход. Для упрощения анализ проводится при следующих предположениях:

1. Жидкая капля имеет сферическую форму.
2. Влиянием конвекции пренебрегают, пламя рассматривают как сферическую поверхность, concentricкую с каплей.

3. Пламя считают разновидностью диффузионного пламени, которое образуется в результате реакции между парами горючего и воздухом, реагирующими в стехиометрическом соотношении.

4. 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.

5. Температура капли одинакова по всему объему.
6. Давление в течение всего процесса горения считается постоянным.
7. Влияние излучения рассматривают отдельно.

Исходя из законов механики сплошных сред, можно получить следующие уравнения нестационарного горения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} = -u \frac{\partial \rho}{\partial l} - \rho \frac{\partial u}{\partial l}, \\ \frac{\partial x}{\partial t} = -u \frac{\partial x}{\partial l} - \frac{x}{\tau}, \\ \frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial l} - R \frac{\partial T_n}{\partial l} - \frac{RT_n}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial l}, \\ \frac{\partial T_n}{\partial t} = (1 - \gamma) T_n \frac{\partial u}{\partial l} - u \frac{\partial T_n}{\partial l} + \frac{xq}{C_v \tau} - \frac{Q(T_n)}{C_v \rho} + K_1(T_c^1 - T_n) + K_1(T_c^2 - T_n), \\ \frac{\partial T_c^1}{\partial t} = w \frac{\partial T_c^1}{\partial l} + K_2(T_n - T_c^1) - Q(T_n, T_c^1), \\ \frac{\partial T_c^2}{\partial t} = -w \frac{\partial T_c^2}{\partial l} + K_2(T_n - T_c^2) - Q(T_n, T_c^2). \end{array} \right. \quad (1)$$

Здесь $x(l,t)$ – концентрация горючего вещества, $\rho(l,t)$, $u(l,t)$, $T_n(l,t)$ – плотность, скорость и температура дымовых газов; $T_c^1(l,t)$, $T_c^2(l,t)$ – температура нисходящего и восходящего потоков нагреваемого сырья; t , l – временная и пространственная координаты.

Начальные условия

$$\rho(l,0) = \rho_0, x(l,0) = x_0, u(l,0) = u_0, T_n(l,0) = T_{n0}, T_c^1(l,0) = T_{c0}^1, T_c^2(l,0) = T_{c0}^2. \quad (2)$$

Граничные условия

$$\rho(0,t) = \alpha_1, x(0,t) = \alpha_2, u(0,t) = \alpha_3, T_n(0,t) = \alpha_4, T_c^1(L,t) = \alpha_5, T_c^2(0,t) = T_c^1(0,t). \quad (3)$$

Здесь L – длина печи.

Стационарную модель, которая следует из (1), рассмотрим более подробно:

$$\begin{aligned} -u \frac{\partial \rho}{\partial l} - \rho \frac{\partial u}{\partial l} &= 0, \\ -u \frac{\partial x}{\partial l} - \frac{x}{\tau} &= 0, \\ -u \frac{\partial u}{\partial l} - R \frac{\partial T_n}{\partial l} - \frac{RT_n}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial l} &= 0, \\ (1-\gamma)T_n \frac{\partial u}{\partial l} - u \frac{\partial T_n}{\partial l} + \frac{x}{C_v \tau} q - \frac{Q(T_n)}{C_v \rho} + K_1(T_c^1 + T_c^2 - 2T_n) &= 0, \\ w \frac{\partial T_c^1}{\partial l} + K_2(T_n - T_c^1) - Q(T_n, T_c^1) &= 0, \\ -w \frac{\partial T_c^2}{\partial l} + K_2(T_n - T_c^2) - Q(T_n, T_c^2) &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Второе, пятое и шестое уравнения содержат пространственные производные только одной неизвестной функции.

Приведем первое, третье и четвертое уравнения к виду, содержащему производную только от одной искомой функции $d\rho/dl$, du/dl и dT_n/dl . Для этого применим теорию о неявных функциях к системе.

$$\begin{aligned} u \frac{\partial \rho}{\partial l} + \rho \frac{\partial u}{\partial l} &= 0, \\ u \frac{\partial u}{\partial l} + R \frac{\partial T_n}{\partial l} + \frac{RT_n}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial l} &= 0, \\ (1-\gamma)T_n \frac{\partial u}{\partial l} - u \frac{\partial T_n}{\partial l} - \frac{x}{C_v \tau} q + \frac{Q(T_n)}{C_v \rho} - K_1(T_c^1 + T_c^2 - 2T_n) &= \varphi. \end{aligned} \quad (5)$$

В этом случае

$$\frac{\partial \rho}{\partial l} = \frac{\Delta_1}{\Delta}, \frac{\partial u}{\partial l} = \frac{\Delta_2}{\Delta}, \frac{\partial T_n}{\partial l} = \frac{\Delta_3}{\Delta}, \quad (6)$$

где

$$\Delta = \begin{vmatrix} u & \rho & 0 \\ \frac{RT_n}{\rho} & u & R \\ 0 & (1-\gamma)T_n & -u \end{vmatrix} = -u^3 + u\rho \frac{RT_n}{\rho} - uR(1-\gamma)T_n = -u^3 + \gamma RuT_n = u(\gamma RT_n - u^2), \quad (7)$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 0 & \rho & 0 \\ 0 & u & R \\ \varphi & (1-\gamma)T_n & -u \end{vmatrix} = R\rho\varphi, \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} u & 0 & 0 \\ \frac{RT_n}{\rho} & 0 & R \\ 0 & \varphi & -u \end{vmatrix} = -Ru\varphi, \quad (8)$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} u & \rho & 0 \\ RT_n & u & 0 \\ \rho & 0 & (1-\gamma)T_n \end{vmatrix} \varphi = u^2 \varphi. \quad (9)$$

Таким образом, будем иметь:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial l} &= \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{R\rho\varphi}{u(\gamma RT_n - u^2)}, \\ \frac{\partial u}{\partial l} &= \frac{\Delta_2}{\Delta} = -\frac{Ru\varphi}{u(\gamma RT_n - u^2)} = -\frac{R\varphi}{\gamma RT_n - u^2}, \\ \frac{\partial T_n}{\partial l} &= \frac{\Delta_3}{\Delta} = \frac{u^2\varphi}{u(\gamma RT_n - u^2)} = \frac{u\varphi}{\gamma RT_n - u^2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Тем самым система (4) приведена к следующему виду:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial l} &= \frac{R\rho \left(-\frac{x}{C_v \tau} q + \frac{Q(T_n)}{C_v \rho} - K_1(T_c^1 + T_c^2 - 2T_n) \right)}{u(\gamma RT_n - u^2)}, \\ \frac{\partial x}{\partial l} &= -u \frac{x}{\tau}, \\ \frac{\partial T_n}{\partial l} &= \frac{u \left(-\frac{x}{C_v \tau} q + \frac{Q(T_n)}{C_v \rho} - K_1(T_c^1 + T_c^2 - 2T_n) \right)}{\gamma RT_n - u^2}, \\ \frac{\partial u}{\partial l} &= \frac{-R \left(-\frac{x}{C_v \tau} q + \frac{Q(T_n)}{C_v \rho} - K_1(T_c^1 + T_c^2 - 2T_n) \right)}{\gamma RT_n - u^2}, \\ \frac{\partial T_c^1}{\partial l} &= \frac{K_2}{w} (T_n - T_c^1) - \frac{1}{w} Q(T_n, T_c^1), \\ \frac{\partial T_c^2}{\partial l} &= -\frac{K_2}{w} (T_n - T_c^2) - \frac{1}{w} Q(T_n, T_c^2). \end{aligned} \quad (11)$$

$$\rho(0) = \alpha_1, x(0) = \alpha_2, u(0) = \alpha_3, T_n(0) = \alpha_4, T_c^1(L) = \alpha_5, T_c^2(0) = T_c^1(0). \quad (12)$$

На рис. 2–5 изображены результаты расчетов стационарных режимов при различных начальных условиях для плотности $\rho(l)$, концентрации $x(l)$, скорости $u(l)$ и температуры дымовых газов $T_n(l)$. При этом за начальные условия приняты $\rho(0)=720$ кг/м³, $x(0)=0,47$, $u(0)=5$ м/с, $T_n(0)=450$ °С, $T_c^1(L)=270$ °С. Затем начальные данные изменялись с шагом ± 5 % при постоянных значениях остальных параметров.

Предлагаемый метод анализа стационарных режимов технологических печей позволяет еще на стадии проектирования ректификационных установок обеспечить высокое качество разделения многокомпонентных смесей в нефтепереработке и нефтехимии.

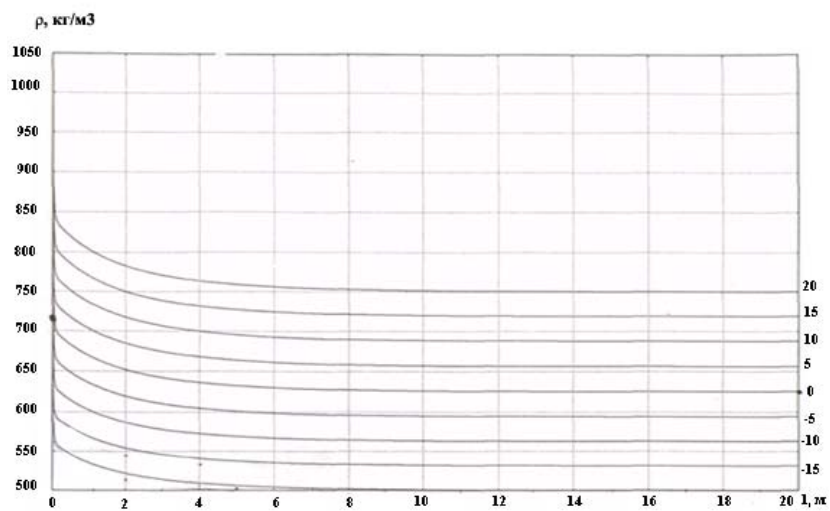


Рис. 2. Графики распределения плотности дымовых газов по длине объекта

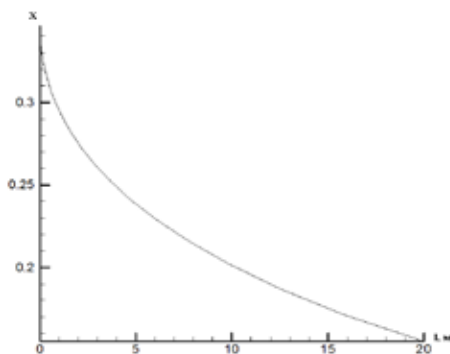


Рис. 3. Графики изменения концентрации по длине объекта

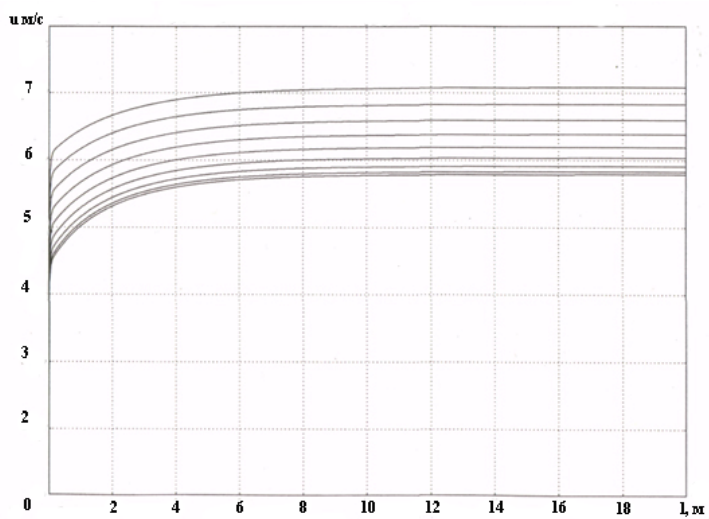


Рис. 4. Графики изменения скорости дымовых газов по длине объекта

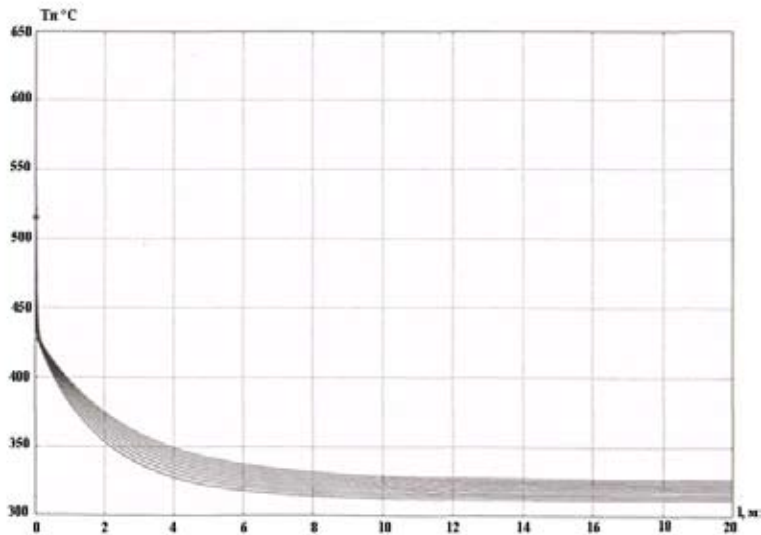


Рис. 5. Графики изменения температуры дымовых газов по длине объекта

Список литературы

- [1] Скобло А.И., Молоканов Ю.К., Владимиров А.И., Щелкунов В.А. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. 677 с.
- [2] Варшавский Г.А. // Бюро новой техники НКАП. М.: Гостехиздат, 1945. № 6. С. 87–106.
- [3] Демиденко Н.Д. // Вестник Томского государственного университета. Управление вычислительная техника и информатика. 2012. № 3 (20). С. 13–21.
- [4] Демиденко Н.Д., Кулагин В.А., Шокин Ю.И. Моделирование и вычислительные технологии распределенных систем. Новосибирск: Наука, 2012. 424 с.
- [5] Демиденко Н.Д., Кулагина Л.В. Моделирование и оптимизация технических систем с распределенными параметрами: учеб. пособие для вузов. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. 210 с.

Numerical Research Method of Stationary Modes in Technological Furnaces

Nikolay D. Demidenko^a and Ludmila V. Kulagina^b

^a*SDTB «Nauka» KSC SB RAS*

53 Mira, Krasnoyarsk, 660049, Russia

^b*Siberian Federal University,*

79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041, Russia

In article we propose mathematical models for stationary and dynamic processes of technological furnaces as object with distributed parameters. This mathematical model is based on the laws of conservation of energy, mass and impulse and includes differential equations in private derivatives. Computational investigation of stationary modes of tubular furnaces is conducted. Formulated boundary-value problem for calculation concentration of combustible substance, density, speed, temperature of the flue gas and temperature of the heated raw materials going on division in rectificative column. Results of calculation technological parameters are presented. The proposed method can be used at automation rectificative plant in petroleum-refining and petrochemical industry.

Keywords: mathematical modeling, distributed parameter systems, heat mass exchange, numerical method.
