

УДК 62.52

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ
В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕЧАХ**

Н. Д. Демиденко, М. И. Альсов

СКТБ «Наука» КНЦ СО РАН

Россия, 660049, Красноярск, просп. Мира, 53. E-mail: mkfs@rambler.ru

В статье предлагаются математические модели для стационарных и динамических процессов технологических печей как объектов с распределенными 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 распределенными параметрами, теплообмен.

NUMERICAL RESEARCH OF STATIONARY MODES IN TECHNOLOGICAL FURNACES

N. D. Demidenko, M. I. Alsov

SDTB «Nauka» KSC of the SB RAS

53 Mira prosp., Krasnoyarsk, 660049, Russia. E-mail: mkfs@rambler.ru

In the article we propose the mathematical models for stationary and dynamic processes of the technological furnaces as objects 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 the stationary modes of tubular furnaces is conducted. For this purpose the boundary-value problem is formulated for calculation of concentration of the combustible substance, density, speed, temperature of the flue gas and temperature of the heated raw materials going for separation to the rectificative column. The results of the calculation of the 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.

Для высокотемпературного нагрева нефти и нефтепродуктов в процессе их переработки в ректификационных установках применяют трубчатые печи. Печи работают следующим образом [1]. Мазут и газ сжигаются 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 сжига-

ется в распыленном виде. 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. В целях упрощения, анализ проводится при следующих предположениях [3; 4]:

1. Жидкая капля имеет сферическую форму.
2. Влиянием конвекции пренебрегают, пламя рассматривают как сферическую поверхность, concentric с каплей.
3. Пламя считают разновидностью диффузионного пламени, которое образуется в результате реакции

между парами горючего и воздухом, которые реагируют 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.

Динамическая модель [3]

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

где $x(l, t)$ – 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

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

Граничные условия

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

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

$$\begin{aligned} -u \frac{\partial \rho}{\partial l} - \rho \frac{\partial u}{\partial l} &= 0, \\ -u \frac{\partial x}{\partial l} - \frac{x}{\tau} &= 0 \end{aligned}$$

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

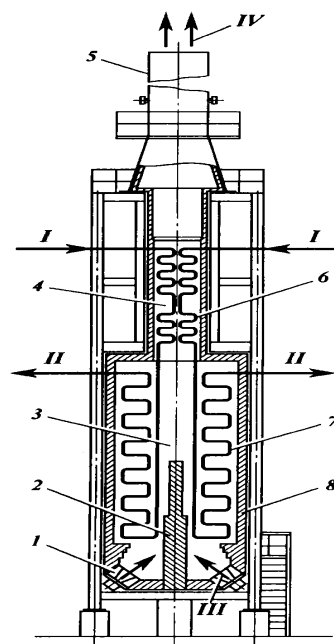


Рис. 1. Схема трубчатой печи:

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. Поток I – вход сырья; II – выход сырья; III – топливо и воздух; IV – дымовые газы

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

Приведем первое, третье и четвертое уравнения к виду, содержащему аналогично производную только от одной искомой функции dp/dt , 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

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

где

$$\Delta = \begin{vmatrix} u & \rho & 0 \\ \frac{RT_n}{\rho} & u & R \\ 0 & (1-\gamma)T_n & -u \end{vmatrix} =$$

$$= -u^3 + u\rho \frac{RT_n}{\rho} - uR(1-\gamma)T_n =$$

$$= -u^3 + \gamma RuT_n = u(\gamma RT_n - u^2),$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 0 & \rho & 0 \\ 0 & u & R \\ \varphi & (1-\gamma)T_n & -u \end{vmatrix} = R\rho\varphi, \quad (7)$$

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

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

Таким образом, будем иметь:

$$\frac{\partial \rho}{\partial l} = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{R\rho\varphi}{u(\gamma RT_n - u^2)},$$

$$\frac{\partial u}{\partial l} = \frac{\Delta_2}{\Delta} = -\frac{Ru\varphi}{u(\gamma RT_n - u^2)} = -\frac{R\varphi}{\gamma RT_n - u^2}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial T_n}{\partial l} = \frac{\Delta_3}{\Delta} = \frac{u^2\varphi}{u(\gamma RT_n - u^2)} = \frac{u\varphi}{\gamma RT_n - u^2}.$$

Тем самым система (4) приведена к следующему виду:

$$\frac{\partial \rho}{\partial l} = \frac{R\rho \left(-\frac{x}{c_v\tau}q + \frac{Q(T_n)}{c_v\rho} - K_1(T_c^1 + T_c^2 - 2T_n) \right)}{u(\gamma RT_n - u^2)}$$

$$\frac{\partial x}{\partial l} = -u \frac{x}{\tau}$$

$$\frac{\partial T_n}{\partial l} = \frac{u \left(-\frac{x}{c_v\tau}q + \frac{Q(T_n)}{c_v\rho} - K_1(T_c^1 + T_c^2 - 2T_n) \right)}{\gamma RT_n - u^2}$$

$$\frac{\partial u}{\partial l} = \frac{-R \left(-\frac{x}{c_v\tau}q + \frac{Q(T_n)}{c_v\rho} - K_1(T_c^1 + T_c^2 - 2T_n) \right)}{\gamma RT_n - u^2}$$

$$\frac{\partial T_c^1}{\partial l} = \frac{K_2}{w}(T_n - T_c^1) - \frac{1}{w}Q(T_n, T_c^1),$$

$$\frac{\partial T_c^2}{\partial l} = -\frac{K_2}{w}(T_n - T_c^2) - \frac{1}{w}Q(T_n, T_c^2), \quad (11)$$

$$\rho(0) = \alpha_1, \quad x(0) = \alpha_2, \quad u(0) = \alpha_3, \quad T_n(0) = \alpha_4, \quad (12)$$

$$T_c^1(L) = \alpha_5, \quad T_c^2(L) = T_c^1(0) = \alpha_6.$$

На рис. 2–5 приведены результаты расчетов стационарных режимов при различных начальных условиях для плотности $\rho(l)$, концентрации $x(l)$, скорости температуры $u(l)$, температуры дымовых газов $T_n(l)$, и нагреваемого сырья $T_c^1(l)$. При этом за начальные условия приняты $\rho(0) = 720 \text{ кг/м}^3$, $x(0) = 0.47$, $u(0) = 5 \text{ м/с}$, $T_n(0) = 450 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_c(0) = 270 \text{ }^\circ\text{C}$. Затем начальные данные изменялись с шагом $\pm 5 \%$ 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.

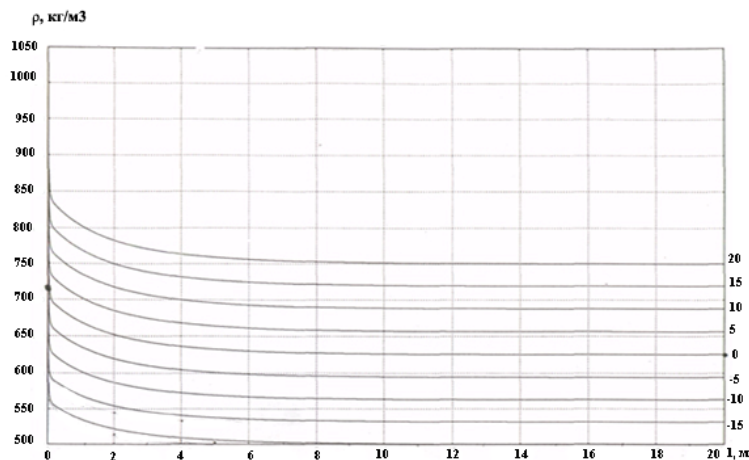


Рис. 2. Графики распределения плотности дымовых газов по длине объекта

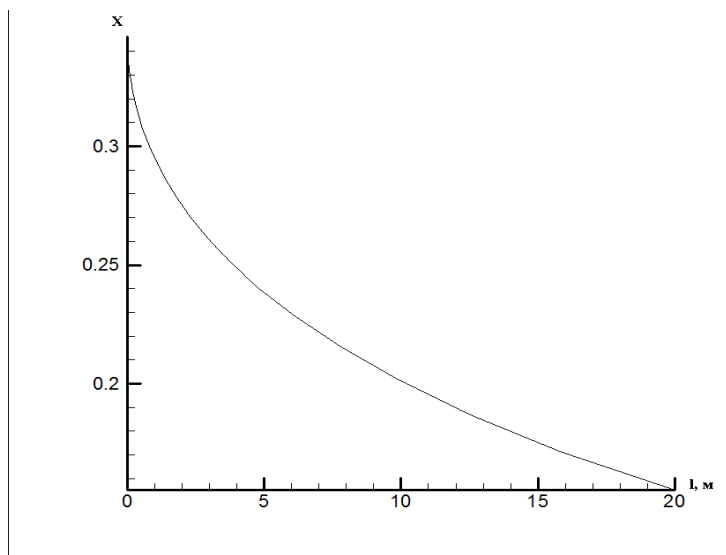


Рис. 3. Графики изменения концентрации по длине объекта

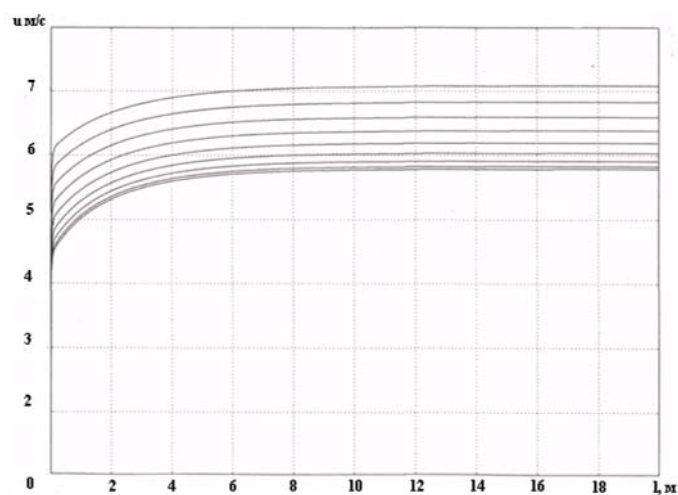


Рис. 4. Графики изменения скорости дымовых газов по длине объекта

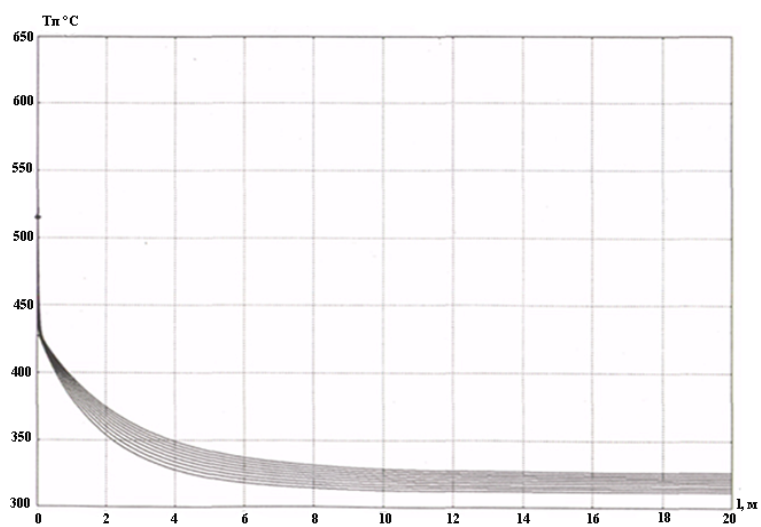


Рис. 5. Графики изменения температуры дымовых газов по длине объекта

Библиографические ссылки

1. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии / А. И. Скобло, Ю. К. Молоканов, А. И. Владимиров, В. А. Щелкунов. М. : ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. 677 с.
2. Варшавский Г. А. Горение капли жидкого топлива (диффузионная теория) // Бюро новой техники НКАП. М. : Гостехиздат, 1945. № 6. С. 87–106.
3. Демиденко Н. Д. Моделирование статических и динамических режимов в трубчатых печах // 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 рас-

пределенных систем. Новосибирск : Наука. 2012. 424 с.

References

1. Skoblo A. I., Molokanov Y. K., Vladimirov A. I., Shchelkunov V. A. *Processes and devices of oil and gas refining and petrochemistry*. Moscow, ООО «Nedra-Biznesstsentr», 2000, 677 p.
2. Warsaw G. A. *Byuro novoy tekhniki NKAP*. Moscow, Gostekhizdat, 1945, no. 6, p. 87–106.
3. Demidenko N. D. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 3 (20), p. 13–21.
4. Demidenko N. D. *Modelirovaniye i vychislitel'nyye tekhnologii raspredelennykh sistem* (Modeling and computing technologies of distributed systems). Novosibirsk, Nauka, 2012, 424 p.

© Демиденко Н. Д., Альсов М. И., 2013

УДК 681.828

ТЕХНОЛОГИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ НЕУПРАВЛЯЕМЫХ ЛЕТАЮЩИХ МОДЕЛЕЙ

В. В. Ильиных, А. В. Ключников, А. В. Лысых, Е. Ф. Михайлов, А. Г. Тимошенко

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина
Россия, Снежинск, ул. Васильева, 13, а. я. 245. E-mail: a.klyuchnikov@bk.ru

Обсужден вопрос о повышении точности контроля параметров массо-инерционной асимметрии высокоскоростных осесимметричных летательных объектов с использованием балансировочного оборудования. Представлены конструкция и принцип действия балансировочного стенда с газовыми опорами, структурная схема измерительной системы. Эффективность предложенной технологии балансировки опробована и осуществлена с положительными результатами на вновь спроектированном динамическом балансировочном стенде. Результаты могут быть полезны исследователям при проектировании подобных измерительных систем на основе средств балансировочной техники и их практическом применении.

Ключевые слова: летающая модель, центр масс, ось инерции, балансировочный стенд, измерительная система, ротор.

TECHNOLOGICAL SUPPORT OF QUALITY DURING THE MANUFACTURE OF HYPERSONIC UNCONTROLLABLE FLYING MODELS

V. V. Ilyikh, A. V. Klyuchnikov, E. F. Mihailov, A. G. Timoshchenko

Russian Federal Nuclear Centre – All-Russia Research Institute of Technical Physics
named after academician E. I. Zababakhin
P. b. 245, 13 Vassilyeva str., Snezhinsk, 456770, Russia. E-mail: a.klyuchnikov@bk.ru

The article considers the question of increase of precision testing of high speed axisymmetric flying objects mass-inertia parameters with the use of counterbalancing equipment. The construction and operating principle of the balancing stand with the gas bearings and a block diagram of measuring system are presented. The effectiveness of the proposed balancing technology is tested and carried out with the newly designed dynamic balancing stand. The results may be useful for research workers in the process of design of the similar measuring systems based on the means of balancing equipment and in the process of their practical employment.

Keywords: flying model, mass centre, axis of inertia, balancing stand, measuring system, rotor.

В работах [1; 2] отмечается, что снижение динамической устойчивости неуправляемой высокоскоростной летающей модели (ЛМ), представляющей собой тело вращения, например, возникающее под действи-

ем массо-инерционной асимметрии, может привести к появлению различных аномалий при движении модели в атмосфере. В частности, возрастают уровни вибрации, а также могут быть реализованы такие анома-