

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕЧАХ

Н.Д. Демиденко, М.И. Альсов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука» Красноярского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук  
Россия, Красноярск, пр. Мира, 53. E-mail: mkfs@rambler.ru

*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.*

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 сжигается в распыленном виде. Крайним случаем горения капель 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].

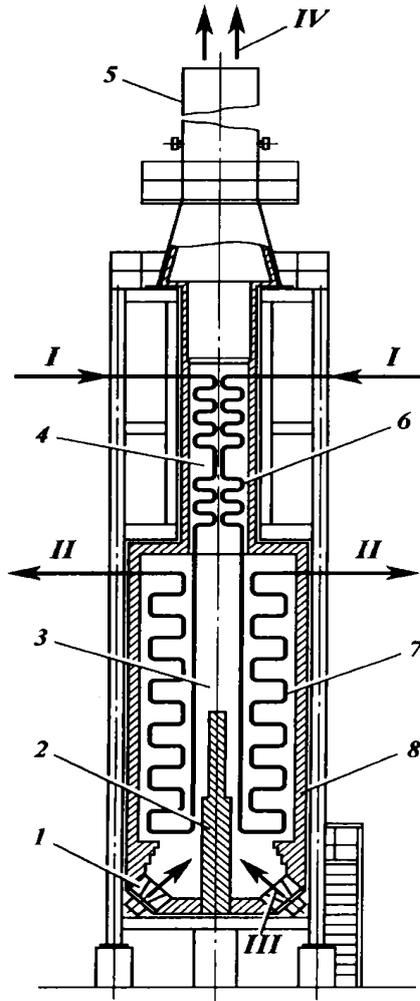


Рис. 1. Схема трубчатой печи: 1 – горелка; 2 – настильная стенка; 3 – камера радиации (топочная камера); 4 – камера конвекции; 5 – дымовая труба; 6 – змеевик конвекционных труб; 7 – змеевик радиантных труб; 8 – футеровка. Поток I – вход сырья; II – выход сырья; III – топливо и воздух; IV – дымовые газы.

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, concentрическую 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 течении 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].

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

где  $x(l, t)$  – концентрация горючего вещества,  $\rho(l, t), u(l, t), T_{\text{п}}(l, t)$  – 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

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

Граничные условия

$$\begin{aligned} \rho(0, t) = \alpha_1, x(0, t) = \alpha_2, u(0, t) = \alpha_3, T_{\text{п}}(0, t) = \alpha_4, T_c^1(L, t) = \alpha_5, T_c^2(0, t) \\ = T_c^1(0, t) = \alpha_6. \end{aligned} \quad (3)$$

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

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

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  $d\rho/dt, du/dl$  и  $dT_{\text{п}}/dl$ . Для этого применим теорию о неявных функциях к системе.

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

В этом случае

$$\frac{\partial \rho}{\partial l} = \frac{\Delta_1}{\Delta}, \quad \frac{\partial u}{\partial l} = \frac{\Delta_2}{\Delta}, \quad \frac{\partial T_{\Pi}}{\partial l} = \frac{\Delta_3}{\Delta}. \tag{6}$$

где

$$\Delta = \begin{vmatrix} u & \rho & 0 \\ \frac{RT_{\Pi}}{\rho} & u & R \\ 0 & (1 - \gamma)T_{\Pi} & -u \end{vmatrix} = -u^3 + u\rho \frac{RT_{\Pi}}{\rho} - uR(1 - \gamma)T_{\Pi} = -u^3 + \gamma RuT_{\Pi} = u(\gamma RT_{\Pi} - u^2), \tag{7}$$

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

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} u & \rho & 0 \\ \frac{RT_{\Pi}}{\rho} & u & 0 \\ 0 & (1 - \gamma)T_{\Pi} & \varphi \end{vmatrix} = u^2\varphi. \tag{9}$$

Таким образом, будем иметь:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \rho}{\partial l} &= \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{R\rho\varphi}{u(\gamma RT_{\Pi} - u^2)} \\
\frac{\partial u}{\partial l} &= \frac{\Delta_2}{\Delta} = -\frac{Ru\varphi}{u(\gamma RT_{\Pi} - u^2)} = -\frac{R\varphi}{\gamma RT_{\Pi} - u^2} \\
\frac{\partial T_{\Pi}}{\partial l} &= \frac{\Delta_3}{\Delta} = \frac{u^2\varphi}{u(\gamma RT_{\Pi} - u^2)} = \frac{u\varphi}{\gamma RT_{\Pi} - u^2}
\end{aligned} \tag{10}$$

Тем самым система (4) приведена к следующему виду:

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

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

$$\frac{\partial T_n}{\partial l} = \frac{u \left( -\frac{x}{C_v \tau} q + \frac{Q(T_n)}{C_v \rho} - K_1(T_c^1 + T_c^2 - 2T_n) \right)}{\gamma R T_n - u^2} \quad (11)$$

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

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

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

$$\rho(0) = \alpha_1, x(0) = \alpha_2, u(0) = \alpha_3, T_n(0) = \alpha_4, T_c^1(L) = \alpha_5, T_c^2(L) = T_c^1(0) = \alpha_6 \quad (12)$$

На рисунке 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  $\rho(0)=720$  кг/м<sup>3</sup>,  $x(0)=0.47$ ,  $u(0)=5$  м/с,  $T_n(0)=450^\circ\text{C}$ ,  $T_c(0)=270^\circ\text{C}$ . Затем начальные данные изменялись с шагом  $\pm 5\%$  при постоянных значениях остальных параметров.

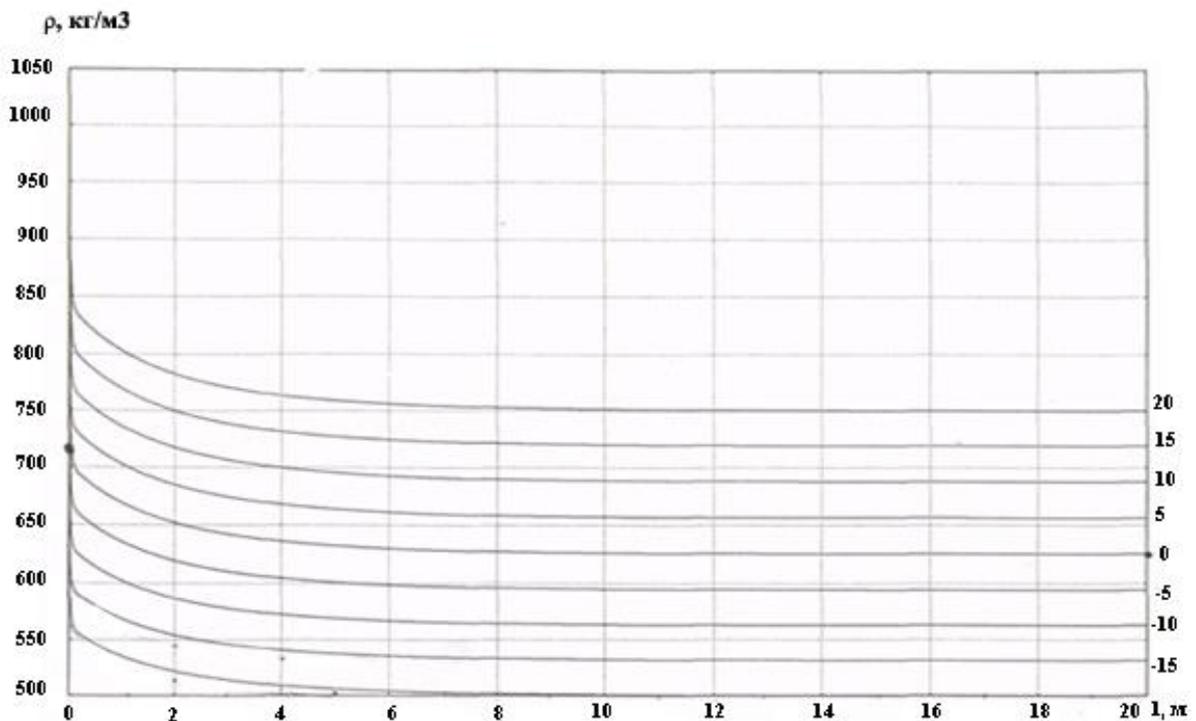


Рис. 2. Графики распределения плотности дымовых газов по длине объекта

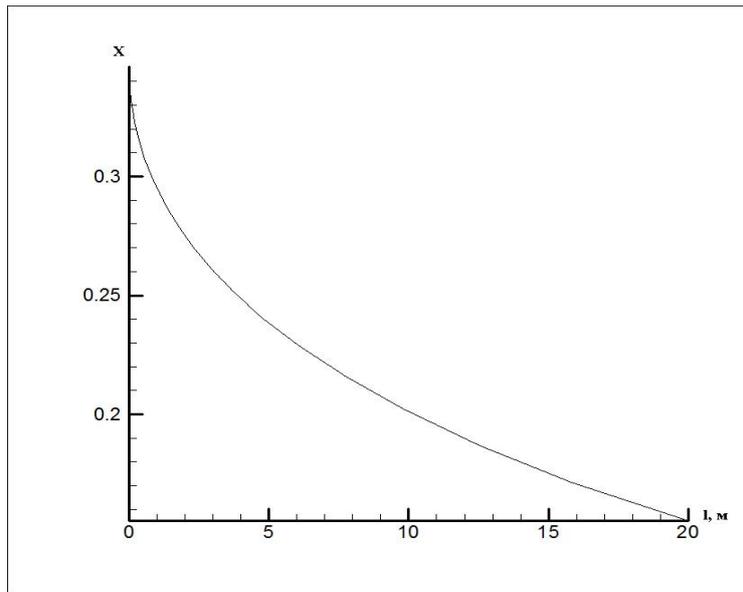


Рис. 3. Графики изменения концентрации по длине объекта

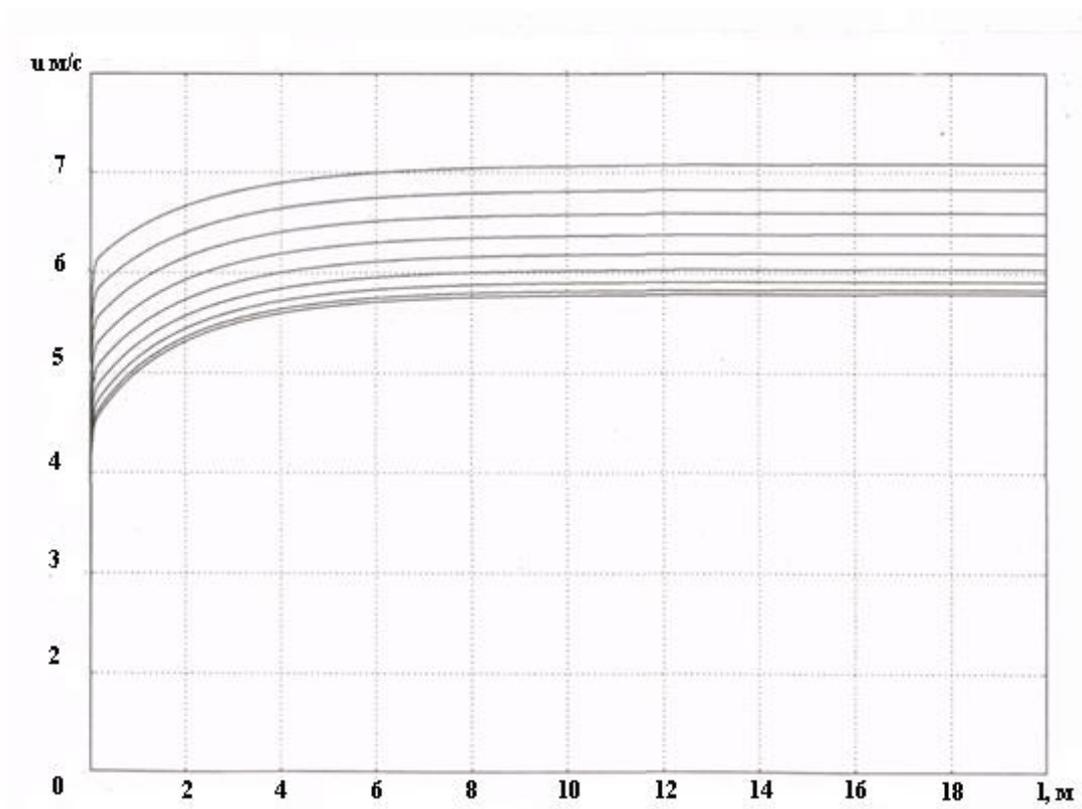


Рис. 4. Графики изменения скорости дымовых газов по длине объекта

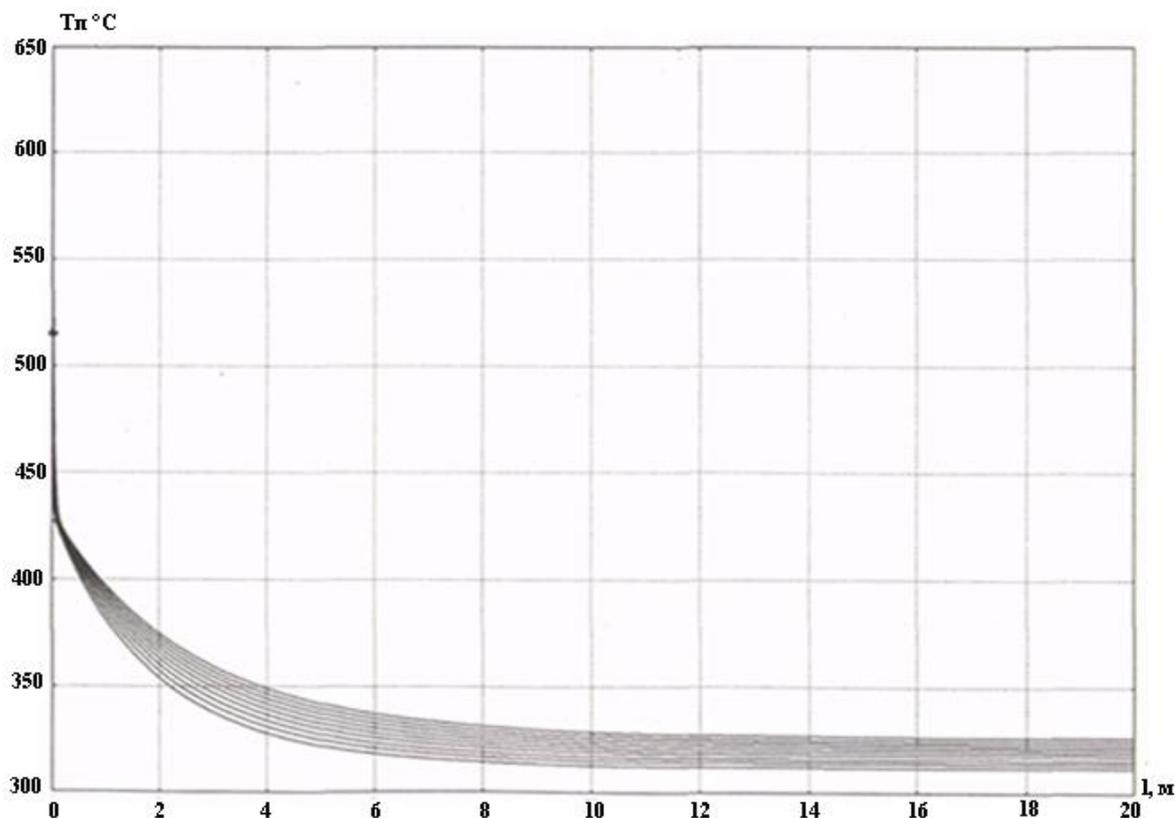


Рис. 5. Графики изменения температуры дымовых газов по длине объекта

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

#### Библиографические ссылки

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. 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. // Управление вычислительная техника и информатика. Вестник Томского государственного университета. 2012. № 3 (20). С. 13-21.
4. Демиденко Н.Д. Моделирование и вычислительные технологии распределенных систем / Н.Д. Демиденко, В.А. Кулагин, Ю.И. Шокин. – Новосибирск: Наука. 2012. 424 с.