

УДК 532.135

ЗАВИСИМОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ПОЛИМЕРИЗАЦИИ ОТ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ УСЛОВИИ КРИТИЧЕСКОГО РЕЖИМА ТЕПЛООБМЕНА В КОАКСИАЛЬНОМ РЕАКТОРЕ

Абайдуллин Б.Р.

Исследовательский центр проблем энергетики, ФБУН «Казанский научный центр Российской академии наук», Казань, e-mail: cyberincorp@mail.ru

В работе приведена математическая модель теплообмена процесса полимеризации метилметакрилата в реакторе коаксиального типа, позволяющая рассматривать распределения характеристик процесса в условиях критического режима теплообмена. Приведены результаты численного исследования с применением данной модели, представленные в виде критических поверхностей. На границе канала были заданы тепловые граничные условия первого рода. На основании проведенного комплекса численных исследований было выявлено, что критическое значение конкретного управляющего параметра изменяется при изменении других управляющих параметров. Таким образом, для критического параметра Франк-Каменецкого было решено построить его зависимости от реологических параметров. Данные зависимости задаются поверхностями. Из анализа полученных поверхностей следует, что при увеличении тепловыделений от диссипации (при усилении движения реакционной смеси в реакторе) критические значения параметра Франк-Каменецкого уменьшаются. Таким образом, при преобладании величины энергии активации вязкого течения над энергией активации химической реакции диапазон критических значений, определяющих процесс, соответствующий безопасному режиму работы, становится уже. Отметим, что при уменьшении значений одного из реологических параметров и фиксированных значениях интенсивности тепловыделений от диссипации существуют области на поверхности, где происходит существенное изменение параметра Франк-Каменецкого при небольшом изменении одного из реологических параметров.

Ключевые слова: неньютоновская жидкость, критический режим теплообмена, коаксиальный реактор, коэффициенты диффузии мономера и инициатора

DEPENDENCE OF THE POLYMERIZATION PROCESS CHARACTERISTICS FROM RHEOLOGICAL PARAMETERS BY THE CONDITION OF CRITICAL HEAT TRANSFER IN COAXIAL REACTOR

Abajdullin B.R.

The research center of the problems in power engineering by the Russian Academy of Science, Kazan, e-mail: cyberincorp@mail.ru

In the given work was a mathematical model of heat and mass polymerization process of metilmetakrilat in the reactor coaxial type presented, this model allows us to consider the distribution characteristics of the process provided a critical mode of heat transfer. The results of numerical research using this model presented in the form of critical surfaces. On the edge of the channel were given thermal boundary conditions of the first kind. After analyze of finded critical surfaces revealed that the critical value of a particular control parameter changes by change of other control parameters. In result it was decided to built the changes of the Frank-Kamenetsky critical parameter according to the rheological parameters. These dependences are presented as a surfaces. After analyzing of this surfaces it follows, that by increasing of heat release from the dissipation (at strengthening the movement of the reaction mixture in the reactor) critical parameter values Frank-Kamenetsky are reduced. In result if we have a prevalence value of the activation energy of viscous flow in contrast with activation energy of a chemical reaction, the critical range of values determining process corresponding to the safe operation mode becomes narrower. Note that with decreasing the values the one of the rheological parameters and fixing values of the rate of heat dissipation, there are areas in the surfaces, where there is a significant change of the parameter Frank-Kamenetsky by the small change the one of the rheological parameters.

Keywords: unnjutonian fluid, critical heat exchange, coaxial rector, diffusion coefficients of monomer and initiator

В работе [1] рассматривались установившееся течение и теплообмен неньютоновской жидкости в коаксиальном канале бесконечной длины со сформировавшимся профилем скорости и температуры. На практике чаще всего наблюдается изменение профиля температуры по длине, и в связи с этим наибольший интерес представляет исследование влияния основных безразмерных параметров на условия возникновения критических режимов теплообмена в канале с учетом изменения температуры по длине и по радиусу. В данном случае численная реализация поставленных задач усложняется

в силу того, что необходимо учитывать конвективный теплоперенос, особенности изменяющегося неньютоновского характера поведения среды, убывание концентраций при условии химической реакции, поэтому в литературе можно встретить небольшое количество работ по данной тематике [5]. Исследование распределений температуры и компонент вектора скорости на начальном участке коаксиального канала в зависимости от интенсивности химического и диссипативного источников при условии преобладания одного из них уже рассмотрены в [3]. Исследования этих характеристик

проведены и от некоторых других основных определяющих параметров, таких как параметр Франк-Каменецкого, параметр, характеризующий энергию активации вязкого течения, параметр, характеризующий энергию активации химической реакции, представленных в [3, 2].

Постановка задачи

При построении математической модели стационарного тепломассобмена при течении неньютоновской жидкости в коаксиальном реакторе приняты следующие допущения: течение ламинарное, осесимметричное, стационарное; теплофизические характеристики жидкости, такие как плотность, теплопроводность и теплоемкость меняются в рассматриваемом диапазоне

температур незначительно и приняты постоянными; силы тяжести входят в уравнения неявно через избыточное давление; перенос тепла вдоль основного направления движения за счет теплопроводности много меньше вынужденного в этом же направлении; профиль скорости почти мгновенно подстраивается под профиль температуры ($Pr \gg 1$); присутствует химический источник теплоты, распределенный по всему объему канала, заданный реакцией дробного порядка. На границе задаются гидродинамические условия прилипания, тепловые и концентрационные граничные условия первого рода.

При сделанных допущениях и некоторых преобразованиях решаемая система уравнений в цилиндрической системе координат будет выглядеть следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial r} \left(-P + 2\mu \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right) + f_1 = \rho \left(v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right), \\ \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-P + 2\mu \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + f_2 = \rho \left(v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right), \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (v_r \cdot r) + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0, \\ v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\mu I_2}{\rho C_p} + \frac{Q_0 K_0}{C_M} e^{-\frac{E}{RT}} M^m J^n, \\ v_r \frac{\partial M}{\partial r} + v_z \frac{\partial M}{\partial z} = D_M \left(\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right) - K_0 e^{-\frac{E}{RT}} M^m J^n, \\ v_r \frac{\partial J}{\partial r} + v_z \frac{\partial J}{\partial z} = D_J \left(\frac{\partial^2 J}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial J}{\partial r} \right) - K_{i0} e^{-\frac{E_i}{RT}} J^n, \end{array} \right. \quad (1)$$

где $f_1 = -\frac{1}{r^3} (2\mu r v_r) + \frac{1}{r} \left(2\mu \frac{\partial v_r}{\partial r} \right)$, $f_2 = \frac{1}{r} \left(\mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right)$.

В этих уравнениях $r_1 \leq r \leq r_2$, $0 \leq z \leq L$; Q_0 – тепловой эффект химической реакции; k_0 – константа скорости химической реакции; E – энергия активации химической реакции; a – коэффициент температуропроводности; $\mu = \mu(T, I_2, M, J)$ – динамическая вязкость; ρ – плотность жидкости; R – универсальная газовая постоянная; c_p – удельная изобарная теплоемкость; c_M – удельная молярная теплоемкость; T – температура; v_z, v_r – компоненты вектора скорости \vec{v} ; P – давление; r_1, r_2 – со-

ответственно внутренний и внешний радиусы коаксиального канала; L – длина канала; K_{i0} – константа скорости реакции иницирования; E_i – энергия активации процесса иницирования; ρ – плотность жидкости; R – универсальная газовая постоянная; M – концентрация мономера; J – концентрация инициатора; D_M, D_J – коэффициенты взаимной диффузии мономера и инициатора. Второй инвариант тензора скоростей деформации I_2 представлен выражением

$$I_2 = \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + 2 \left(\frac{v_r}{r} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2, \quad (2)$$

Также в системе (1) приняты допущения, что для системы уравнений (1) граничные условия задаются в виде

$$\begin{aligned} 1. v_z|_{r=r_1} = 0, T|_{r=r_1} = T_0, v_r|_{r=r_1} = 0, M|_{r=r_1} = 0, J|_{r=r_1} = 0. \\ 2. v_z|_{r=r_2} = 0, v_r|_{r=r_2} = 0, T|_{r=r_2} = T_0, M|_{r=r_2} = 0, J|_{r=r_2} = 0. \\ 3. M|_{z=0} = M_0, J|_{z=0} = J_0, T|_{z=0} = T^0, v_r|_{z=0} = 0, v_z|_{z=0} = v_{z_0}(r), \mu|_{z=0} = \mu^0, \end{aligned} \quad (3)$$

где T_0 – температура окружающей среды; T^0 – температура на входе в коаксиальный канал.

На входе в канал профиль компоненты v вектора скорости \vec{v} (то есть функция $v_{z_0}(r^2)$) является решением задачи

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) = \frac{\partial P}{\partial z}, \quad (4)$$

при этом $T|_{z=0} = T^0$, а составляющая градиента давления $\frac{\partial P}{\partial z}$ в направлении оси z определяется из выражения

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\frac{1}{Q} \int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} \mu(T, I_2) \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} \right)^2 r dr d\phi, \quad (5)$$

где Q – расход жидкости через поперечное сечение канала.

В качестве реологической модели используется модель Кутателадзе–Хабахпашевой [4] для структурно вязкой жидкости, подробно описанная в [3].

Приведа вязкость к безразмерному виду, получим

$$\tilde{\mu} = \frac{1}{\tilde{\phi}} = \frac{1}{\tilde{\phi}_\infty - (\tilde{\phi}_\infty - c_8 \tilde{\phi}_0) \cdot \exp\left(-c_9 \tilde{\Theta} \frac{c_7 \tilde{\tau}}{\tilde{\phi}_\infty - c_8 \tilde{\phi}_0}\right)}; \quad (6)$$

$$\tilde{\phi}_\infty = (c_1 - (1 - \tilde{M})) \cdot \exp\left(\frac{-c_2 + c_3(1 - \tilde{M})}{\beta(1 + \beta\theta)}\right); \quad \tilde{\tau} = \tilde{\mu} \sqrt{\tilde{I}_2}; \quad (7)$$

$$\tilde{\phi}_0 = (c_4 - (1 - \tilde{M})) \cdot \exp\left(\frac{-c_5 + c_6(1 - \tilde{M})}{\beta(1 + \beta\theta)}\right); \quad \tilde{\Theta} = (1 - \tilde{M}) \cdot \exp\left(\frac{-c_5 + c_6(1 - \tilde{M})}{\beta(1 + \beta\theta)}\right). \quad (8)$$

Подставляя (6) в (1) и переходя к безразмерным параметрам, имеем

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tilde{r}} \left((\sigma + \tilde{r}) \tilde{\mu}(\tilde{I}_2, \theta) \frac{\partial \tilde{W}}{\partial \tilde{r}} \right) &= -(\sigma + \tilde{r}) \int_0^1 \tilde{\mu}(\tilde{I}_2, \theta) \left(\frac{\partial \tilde{W}}{\partial \tilde{r}} \right)^2 (\sigma + \tilde{r}) d\tilde{r}, \\ \frac{\partial}{\partial \tilde{r}} \left((\sigma + \tilde{r}) \tilde{V} \right) + (\sigma + \tilde{r}) \frac{\partial \tilde{W}}{\partial \tilde{z}} &= 0, \\ (\sigma + \tilde{r}) \left(\gamma \tilde{V} \frac{\partial \theta}{\partial \tilde{r}} + \gamma \tilde{W} \frac{\partial \theta}{\partial \tilde{z}} \right) &= \frac{\partial}{\partial \tilde{r}} \left((\sigma + \tilde{r}) \frac{\partial \theta}{\partial \tilde{r}} \right) + \delta(\sigma + \tilde{r}) \tilde{M}^m \tilde{J}^n \exp\left(\frac{\theta}{1 + \beta\theta}\right) + \chi(\sigma + \tilde{r}) \tilde{\mu}(\tilde{I}_2, \theta) \tilde{I}_2, \\ (\sigma + \tilde{r}) \left(\gamma_M \tilde{V} \frac{\partial \tilde{M}}{\partial \tilde{r}} + \gamma_M \tilde{W} \frac{\partial \tilde{M}}{\partial \tilde{z}} \right) &= \frac{\partial}{\partial \tilde{r}} \left((\sigma + \tilde{r}) \frac{\partial \tilde{M}}{\partial \tilde{r}} \right) - \delta_M(\sigma + \tilde{r}) \tilde{M}^m \tilde{J}^n \exp\left(\frac{\theta}{1 + \beta\theta}\right), \\ (\sigma + \tilde{r}) \left(\gamma_J \tilde{V} \frac{\partial \tilde{J}}{\partial \tilde{r}} + \gamma_J \tilde{W} \frac{\partial \tilde{J}}{\partial \tilde{z}} \right) &= \frac{\partial}{\partial \tilde{r}} \left((\sigma + \tilde{r}) \frac{\partial \tilde{J}}{\partial \tilde{r}} \right) - \delta_J(\sigma + \tilde{r}) \tilde{J}^n \exp\left(\frac{\theta}{1 + \beta\theta}\right). \end{aligned} \right. \quad (9)$$

Для приведения системы уравнений (1) к безразмерному виду используются обозначения:

$\tilde{z} = \frac{z}{L}$ – безразмерная продольная координата;

$\tilde{r} = \frac{r - r_1}{r_2 - r_1}$ – безразмерная поперечная координата;

$\beta = \frac{RT_0}{E}$ – безразмерный параметр, число Аррениуса;

$\theta = \frac{E}{RT_0^2}(T - T_0)$ – безразмерная температура;

$\tilde{W} = \frac{2\pi(r_2 - r_1)^2}{Q} \cdot v_z$ – безразмерная осевая компонента вектора скорости \vec{v} ;

$\tilde{V} = \frac{2\pi L(r_2 - r_1)}{Q} \cdot v_r$ – безразмерная радиальная компонента вектора скорости \vec{v} ;

$\beta_J = \frac{E_J}{E}$ – число Аррениуса из уравнения для инициатора;

$\tilde{J} = \frac{J}{J_0}$ – нормированная по длине концентрации инициатора;

$\tilde{M} = \frac{M}{M_0}$ – нормированная по длине концентрация мономера;

$\tilde{\mu} = \mu K_{A_\infty}$ – коэффициент динамической вязкости;

$c_1 = \frac{A_\infty^{n=0}}{K_{A_\infty}}$; $c_2 = \frac{B_\infty^{n=0}}{E}$; $c_3 = \frac{K_{B_\infty}}{E}$; $c_4 = \frac{A_0^{n=0}}{K_{A_0}}$;

$c_5 = \frac{B_0^{n=0}}{E}$; $c_6 = \frac{K_{B_0}}{E}$; $c_7 = \frac{Q}{2\pi \cdot K_{A_\infty} (r_2 - r_1)^3}$;

$c_8 = \frac{K_{A_0}}{K_{A_\infty}}$; $c_9 = \frac{K_\Theta}{K_{A_\infty}}$ – реологические параметры;

$\delta = \frac{Q_0 K_0 (r_2 - r_1)^2 E}{\lambda R T_0^2} M_0^m J_0^n \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right)$ –

безразмерный параметр Франк-Каменецкого, характеризующий интенсивность химического источника тепловыделения;

$\delta_M = \frac{K_0 M_0^{m-1} J_0^n (r_2 - r_1)^2}{D_M} \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right)$,

$\delta_J = \frac{K_{i0} J_0^{n-1} (r_2 - r_1)^2}{D_J} \exp\left(-\frac{E_i}{RT_0}\right)$ – без-

размерный параметр Франк-Каменецкого, характеризующий интенсивность массовыделения в результате химической реакции;

$\chi = \frac{Q^2 E}{K_{A_\infty} 4\pi^2 \lambda R T_0^2 (r_2 - r_1)^4}$ – безразмерный

параметр, характеризующий интенсивность тепловыделения от вязкого течения.

После перехода к безразмерным параметрам граничные условия первого рода (3) примут вид

$$\begin{aligned} 1. \tilde{W}|_{\tilde{r}=0} = 0, \tilde{V}|_{\tilde{r}=0} = 0, \theta|_{\tilde{r}=0} = 0, \tilde{M}|_{\tilde{r}=0} = 0, \tilde{J}|_{\tilde{r}=0} = 0. \\ 2. \tilde{W}|_{\tilde{r}=1} = 0, \tilde{V}|_{\tilde{r}=1} = 0, \theta|_{\tilde{r}=1} = 0, \tilde{M}|_{\tilde{r}=1} = 0, \tilde{J}|_{\tilde{r}=1} = 0. \\ 3. \tilde{M}|_{\tilde{z}=0} = 1, \tilde{J}|_{\tilde{z}=0} = 1, \theta|_{\tilde{z}=0} = 0, \tilde{\mu}|_{\tilde{z}=0} = 1, \tilde{V}|_{\tilde{z}=0} = 0, \tilde{W}|_{\tilde{z}=0} = \tilde{W}_0(r). \end{aligned} \quad (10)$$

Для решения системы уравнений (9) с граничными условиями (10) используется тот же итерационный алгоритм. Он включает в себя решение соответствующих трехточечных разностных уравнений методом прогонки с пересчетом всех коэффициентов уравнений, зависящих от искомым функций. Вследствие нелинейности системы уравнений (9) и неявного вида функции вязкости были введены дополнительные итерации по вязкости и по нелинейному свободному члену.

Результаты

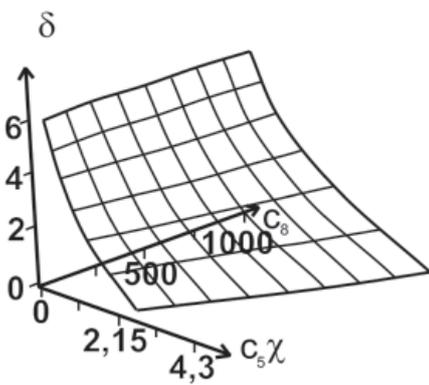
На основании проведенного комплекса численных исследований было выявлено, что критическое значение конкретного управляющего параметра изменяется при изменении других управляющих параметров. Таким образом, для критического параметра δ было решено построить его зависимости от реологических параметров. Данные зависимости задаются поверхностями, которые называют критическими поверхностями. Они дают более общее наглядное представление

о взаимном влиянии безразмерных параметров друг на друга, а также об их влиянии на возникновение критических режимов теплообмена в реакторе.

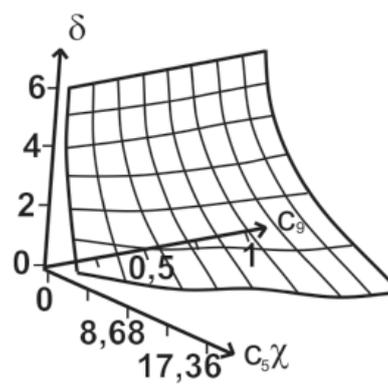
Критические поверхности разделяют область допустимых значений безразмерных управляющих параметров на две подобласти, одна из них соответствует безопасному режиму теплообмена в реакторе, а другая – критическому режиму теплообмена. В случае, когда безразмерные параметры принимают значения из области безопасного режима теплообмена, критические явления в реакторе не возникают. Ещё один положительный момент критических поверхностей состоит в том, что объединяют в себе множество зависимостей, определяющих процесс параметров от управляющих параметров. В данной работе критические поверхности строятся для критических значений управляющих параметров в точках с координатой $\tilde{r} = 0,5$ и координатой \tilde{z} , которая меняется в пределах конечной допустимой длины коаксиального реактора.

В используемой в данной работе реологической модели параметр c_9 находится под экспонентой в зависимости вязкости от скорости сдвига и температуры, а параметр c_8 – перед экспонентой данной зависимости. В данном случае нельзя провести классификацию типов жидкостей, соответствующих определенным значениям параметров $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, c_9$, как это было сделано относительно параметров c_0 и c_1 в бесконечном коаксиальном канале в [1], но определенную приближенную аналогию провести можно.

Параметру c_0 в реологической модели в [1] соответствует параметр c_8 из реологической модели в [1], параметру c_1 – параметр c_9 , а параметру α параметр c_5 . При $c_8 > 1, c_9 > 0$ жидкость считается псевдопластичной, при $c_8 < 1, c_9 > 0$ дилатантной и при $c_8 = 1, c_9 > 0$ ньютоновской. Поэтому на рисунке приведены критические поверхности, содержащие именно эти параметры, а именно соответствующие зависимости параметра δ от реологических параметров c_8 и $c_5\chi$, и от параметров c_9 и $c_5\chi$.



а



б

Критические поверхности зависимостей $\delta = \delta(c_8, c_5\chi)$ и $\delta = \delta(c_9, c_5\chi)$

Как видно на графиках, при увеличении тепловыделений от диссипации ($c_5\chi$ растет) при движении реакционной смеси в реакторе критические значения параметра δ уменьшаются. Таким образом, при превалировании величины энергии активации вязкого течения над энергией активации химической реакции диапазон критических значений определяющих процесс, соответствующий безопасному режиму работы, становится уже. Отметим, что при уменьшении значений c_8 и фиксированных значениях $c_5\chi$ существуют области на поверхности (рисунок, а), где происходит существенное изменение δ при небольшом изменении c_8 .

Как следует из графика $\delta = \delta(c_9, c_5\chi)$ на рисунке (б), критические значения параметра δ не изменяются при изменении параметра c_9 .

Список литературы

1. Абайдуллин Б.Р. Влияние геометрии бесконечно-го коаксиального канала и реологических характеристик жидкости на критические значения температуры, скорости и вязкости. // Труды Академэнерго – 2006. – № 3. – С. 16–27.
2. Абайдуллин Б.Р. Зависимости характеристик теплообмена от параметра Франк-Каменецкого при критическом режиме теплообмена неньютоновской жидкости в реакторе. // Труды Академэнерго. – 2012. – № 4. – С. 20–28.
3. Абайдуллин Б.Р. Исследование влияния основных определяющих параметров на критический теплообмен при течении неньютоновской жидкости на начальном участке коаксиального канала. // Труды Академэнерго. – 2007. – № 3. – С. 13–24.
4. Кутателадзе С.С., Хабахпашева Е.М., Попов В.И., К гидродинамике жидкостей с переменной вязкостью // ПМТФ. – 1966. – № 1. – С. 45–49.
5. Франк-Каменецкий Д.А. Теплопередача и диффузия в химической кинетике. – 3-е изд. – М.: Наука, 1987. – С. 320–358.

References

1. Abaidullin BR Vliyanie geometrii beskonecnogo koaksialnogo kanala i reologicheskikh harakteristik shidkosti na kriticheskie znachenija temperatury, skorosti i vjazkosti [The influence of the geometry of the coaxial endless channel and rheological characteristics of fluid to critical values of temperature, velocity, and viscosity]. Scient. Journ. Works of Akademenergo, 2006, no. 3, pp. 16–27.
2. Abaidullin BR Zavisimosti harakteristik teplomassobmena ot parametra Frank-Kameneckogo pri kriticeskom reshime teplomassobmena nenjutonovskoj shidkosti v reaktore [Dependence of heat and mass transfer characteristics from the Frank-Kamenetskij parameter by the critical heat exchange of non-Newtonian fluid in the reactor]. Scient. Journ. Works of Akademenergo, 2012, no. 4, pp. 20–28.
3. Abaidullin BR Issledovanie vlijaniya osnovnyh opredelajushih parametrov na kriticheskiy teplomassobmen pri techenii nenjutonovskoj shidkosti na naczalnom ucastke koaksialnogo kanala [The reserch of the influence the main defining parameters to the critical heat transfer by the non-Newtonian fluid flow in the initial section of the coaxial channel]. Scient. Journ. Works of Akademenergo, 2007, no. 1, pp. 13–24.
4. Kutateladze S.S., Khabakhpasheva E.M., Popov V.I. K gidrodinamike shidkostej s peremennoj vjazkosju [Hydrodynamics of fluids with variable viscosity]. J. Appl PMTF, 1966, no. 1, pp. 45–49.
5. Frank-Kamenetsky D.A. Teplperedaca i diffizija v himiceskoj kinetike [Heat transfer and diffusion in chemical kinetics]. 3rd ed. Nauka, Moscow, 1987, pp. 320–358.

Рецензенты:

Вачагина Е.К., д.т.н., зав. лабораторией ТФИ, Исследовательский центр проблем энергетики, ФБУН «Казанский научный центр Российской академии наук», г. Казань; Молочников В.М., д.т.н., зав. лабораторией ГИТ, Исследовательский центр проблем энергетики, ФБУН «Казанский научный центр Российской академии наук», г. Казань
Работа поступила в редакцию 17.01.2014.