УДК 517.958:531.12;66.021:523.529

НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ ТЕЧЕНИЕ ДВУХФАЗНЫХ СРЕД В ТРУБАХ С ПРОНИЦАЕМЫМИ СТЕНКАМИ

Ахмадиев Ф.Г.[1], Фарахов М.И.[2], Исянов Ч.Х.[2]

[1]Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Казань, Россия
[2]ООО Инженерно-внедренческий Центр «ИНЖЕХИМ», Казань, Россия

АННОТАЦИЯ

Изучена гидродинамическая обстановка в трубчатых фильтрующих элементах, работающих в неизотермических условиях. Для описания процесса разделения двухфазных суспензий использованы уравнения механики гетерогенных сред, которые записаны и упрощены в цилиндрической системе координат с учетом особенностей течения. Задача решается полуаналитически. Используя методы поверхностей равных расходов и Слезкина, проведены численные расчеты по построенной математической модели для конкретных реализаций процесса разделения. Для вычисления толщины слоя осадка дисперсных включений и их средней концентрации по поперечному сечению области течения используются соответствующие дифференциальные уравнения, полученные из условия баланса твердой фазы.

Построенная математическая модель позволяет рассчитать процессы неизотермического течения двухфазных сред в различных режимах в каналах и трубах с проницаемыми стенками и определить все характеристики процесса разделения и размеры фильтра.

ВВЕДЕНИЕ

Среди гидромеханических процессов химической технологии и смежных отраслей промышленности процессы разделения гетерогенных сред, фильтрования занимают особое место и составляют основу этих процессов. Для разделения гетерогенных смесей в качестве рабочих элементов используются различные каналы, трубы с проницаемыми поверхностями, в которых реализуются совместное течение и фильтрование их через проницаемые стенки аппарата. Такие течения используются, например, в патронных и динамических фильтрах, фильтрах–сгустителях, сепараторах, трубчатых мембранных элементах и т.д., например, [1]. Гидродинамическая обстановка в аппарате определяет основные закономерности процессов разделения и ее изучение является основой при построении методов его расчета. Очень важно при выполнении гидродинамических расчетов таких аппаратов учитывать влияние изменения давления, температуры, сложный реологический характер среды, концентрации фаз и толщины слоя осадка вдоль канала на характер процесса. Температура суспензии влияет на вязкостные характеристики среды, что приводит к изменению эффективности процесса фильтрования, поэтому необходимо поддерживать определенный температурный режим рабочей среды.

Целью данной работы является построение математической модели неизотермических течений двухфазных суспензий в трубчатых фильтровальных элементах с учетом процесса фильтрования через стенку рабочей поверхности и численной схемы их расчета.

Рабочая среда в процессах разделения представляет собой гетерогенные смеси и для описания их термогидродинамики можно успешно использовать методы механики многофазных сред.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Рассматривается ламинарное, осесимметричное, неизотермическое и установившиеся течение гетерогенной среды с твёрдой фазой в проницаемых каналах и трубах различной геометрической формы. Реологическое уравнение состояния неоднородной среды описывается степенной моделью Оствальда де Виля. Уравнения сохранения записываются в ортогональной системе координат, в которой одна из координатных поверхностей совпадает со стенкой канала, а координатные поверхности составляют семейство нормалей к ней. Схема течения представлена на рис. 1. На вход в трубчатый фильтр подается двухфазная среда с входными температурами фаз $T_{1,\,BX}$ и $T_{2,\,BX}$, температура стенки трубы (пористой поверхности) $-T_{CT}$. На входе в трубчатый элемент задано

© Ахмадиев Ф.Г., Фарахов М.И., Исянов Ч.Х.

давление P_{BX}, на внешней поверхности стенки поддерживается давление $P_{ВЫХ}$.

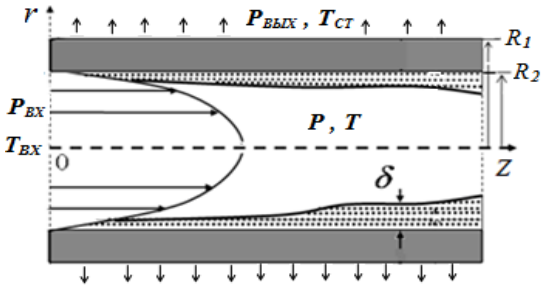

Рис. 1 Схема течения

В дальнейшем для простоты решения будем считать, что $T_{1,BX} \approx T_{2,BX} = T_{BX}$ и температуры фаз мало отличаются друг от друга. При значительном превышении длины над поперечным размером канала, в этой выбранной системе координат, порядок продольной скорости основного потока будет значительно превышать порядок поперечной скорости. После проведения анализа значимости слагаемых, двумерные упрощенные уравнения сохранения механики многофазных сред [2] в размерных переменных в ортогональной системе координат, связанной с областью двухфазного неизотермического течения, согласно [3,4], запишутся в виде:

$$\frac{\partial(H_2H_3\rho_1U_1)}{\partial x_1}+\frac{\partial(H_2H_3\rho_1V_1)}{\partial x_2}=0, \quad (1)$$

$$\rho_1\left(\frac{U_1}{H_1}\frac{\partial U_1}{\partial x_1}+\frac{V_1}{H_2}\frac{\partial U_1}{\partial x_2}+\frac{U_1V_1}{H_1H_2}\frac{\partial H_1}{\partial x_2}\right)= \quad , \quad (2)$$

$$=-\frac{\alpha_1}{H_1}\frac{\partial P}{\partial x_1}+\tau_1-F_{12x_1}+\rho_1F_1$$

$$\rho_1\frac{U_1^2}{H_1H_2}\frac{\partial H_1}{\partial x_2}=-\frac{\alpha_1}{H_2}\frac{\partial P}{\partial x_2}-F_{12x_2}+\rho_1F_2, , \quad (3)$$

$$\rho_i c_{p_i}\left(\frac{U_i}{H_1}\frac{\partial T_i}{\partial x_1}+\frac{V_i}{H_2}\frac{\partial T_i}{\partial x_2}\right)=$$

$$=\frac{1}{H_1H_2H_3}\frac{\partial}{\partial x_2}\left(\frac{H_1H_3}{H_2}\lambda_i\frac{\partial T_i}{\partial x_2}\right), \quad (4)$$

$$i=1,2$$

$$\frac{\partial(H_2H_3\rho_2U_2)}{\partial x_1}+\frac{\partial(H_2H_3\rho_2V_2)}{\partial x_2}=0, \quad (5)$$

$$\rho_2\left(\frac{U_2}{H_1}\frac{\partial U_2}{\partial x_1}+\frac{V_2}{H_2}\frac{\partial U_2}{\partial x_2}+\frac{U_2V_2}{H_1H_2}\frac{\partial H_1}{\partial x_2}\right)=_1, \quad (6)$$

$$=-\frac{\alpha_2}{H_1}\frac{\partial P}{\partial x_1}+F_{12x_1}+\rho_2F$$

$$\rho_2\frac{U_2^2}{H_1H_2}\frac{\partial H_1}{\partial x_2}=-\frac{\alpha_2}{H_2}\frac{\partial P}{\partial x_2}+F_{12x_2}+\rho_2F_2, \quad (7)$$

$$\alpha_1+\alpha_2=1, \quad (8)$$

При $T_1 \approx T_2 = T -$ температура смеси:

$$\rho\ c_p\left(\frac{U}{H_1}\frac{\partial T}{\partial x_1}+\frac{V}{H_2}\frac{\partial T}{\partial x_2}\right)=$$

$$=\frac{1}{H_1H_2H_3}\frac{\partial}{\partial x_2}\left(\frac{H_1H_3}{H_2}\lambda\ \frac{\partial T}{\partial x_2}\right) \quad (9)$$

Уравнения фильтрации, сохранения энергии для течений через тонкий слой образовавшегося осадка и через стенку тонких фильтров (при одномерной фильтрации) соответственно записываются в виде:

$$\frac{\partial(H_2H_3V_m)}{dx_2}=0,\ V_m^n=-\frac{k_m}{\psi_m}\cdot\frac{\partial P_m}{H_2\partial x_2}, \quad (10)$$

$$c_{p_1}\rho_{1m}\frac{V_m}{H_2}\cdot\frac{\partial T_m}{\partial x_2}=$$

$$=\frac{1}{H_1H_2H_3}\cdot\frac{\partial}{\partial x_2}\left(\frac{H_1H_3}{H_2}\lambda_{1m}\frac{\partial T_m}{\partial x_2}\right), \quad (11)$$

$$\frac{\partial(H_2H_3V_0)}{\partial x_2}=0,\ V_o^n=-\frac{k_o}{\psi_o}\cdot\frac{\partial P_o}{H_2\partial x_2}, \quad (12)$$

$$c_{p_1}\rho_{10}\frac{V_o}{H_2}\cdot\frac{\partial T_o}{\partial x_2}=$$

$$=\frac{1}{H_1H_2H_3}\frac{\partial}{\partial x_2}\left(\frac{H_1H_3}{H_2}\lambda_{10}\frac{\partial T_o}{\partial x_2}\right), \quad (13)$$

где

$$\tau_1=\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial}{\partial r}\left[m\cdot r\cdot\frac{\partial U_1}{\partial r}\cdot\left|\frac{\partial U_1}{\partial r}\right|^{n-1}\right], m(T,\alpha_2)-$$

динамическая эффективная вязкость жидкой фазы, $\overline{F}_{12}-$ вектор силы межфазного взаимодействия; U,V – компоненты вектора скорости; ρ, T, λ, c_p плотность, температура, коэффициент теплопроводности и теплоемкость смеси; F_1, F_2 – компоненты вектора массовой силы; δ – толщина осадка; P_m, V_m – давление и скорость жидкой фазы при фильтрации через стенку; K_m – коэффициент проницаемости стенки, ψ_m – эквивалентная (кажущаяся) вязкость жидкости в стенке; P_0, V_0- давление и скорость жидкой фазы при фильтрации через слой осадка;

K_0 – коэффициент проницаемости слоя осадка, ψ_0 – эквивалентная (кажущаяся) вязкость жидкости в слое осадка; α_1, α_2 – объемные концентрации несущей и твердой фаз соответственно: ρ_1, ρ_2 – приведенные плотности; ρ_{10}, ρ_{1m} – "размазанные плотности" несущей фазы при её течении в порах осадка и стенки.

Сила межфазного взаимодействия для гетерогенных систем с вязкой сплошной средой, особенно для систем со сложной реологией, в основном определяется вязким трением на межфазной поверхности. Сила межфазного взаимодействия, действующая на дисперсную частицу со стороны потока неньютоновской жидкости, подчиняющейся степенному реологическому закону, будет зависеть от параметра *n*, критерия Рейнольдса Re_{12}, концентрации α_2 и от размеров частицы. Коэффициент сопротивления для степенных жидкостей может быть вычислен с помощью эмпирических формул [2,5–8].

Коэффициент эффективной вязкости *m* сильно зависит от концентрации твердых включений и от температуры сплошной среды. В работах [9–11] можно найти различные формулы для эффективной вязкости, справедливых при определенных диапазонах изменения α_2 и *n*. Так как коэффициент *n* мало зависит от температуры, то для реологического закона Оствальда де Виля можно использовать степенную аппроксимацию зависимости от температуры:

$$\frac{m_0(T)}{m(T)} = 1 + \sum_{k=1}^{n_1} a_k \cdot \theta^k , \qquad (14)$$

где $\theta = \dfrac{T - T_{BX}}{T_{CT} - T_{BX}}$.

В дальнейшем рассматривается течение гетерогенной среды с твёрдой фазой в цилиндрических каналах и трубах.

Граничные условия для задачи (1)–(13) следующие:

при $r = 0$: $\partial U_1 / \partial r = 0$, $V_1 = 0$, $\partial U_2 / \partial r = 0$, $\partial T / \partial r = 0$ (15.1)

при $r = R_2 - \delta$: $P = P_0$, $U_1 = 0$, $\alpha_1 V_1 = V_0$, $U_2 = 0$, $V_2 = 0$, (15.2)

$T_0 = T$, $\lambda \cdot \partial T / \partial r = \lambda_{10} \cdot \partial T_0 / \partial r$.

при $r = R_2$: $P_0 = P_m$, $V_0 = V_m$, (15.3)

$T_0 = T_m$,

$\lambda_{1m} \cdot \partial T_m / \partial r = \lambda_{10} \cdot \partial T_0 / \partial r$,

при $r = R_1$: $P_m = P_{вых}$, $T_m = T_{CT}$ (15.4)

Граничные условия на входе при $z = z_i$:

$U_1 = U_{1i}(r)$, $U_2 = U_{2i}(r)$, $V_{1i}(r) = 0$, $V_{2i}(r) = 0$, $T(r) = T_{вх}$, $P(r) = P_{BX}$.

Здесь $U_{1i}(r)$, $V_{1i}(r)$, $U_{2i}(r)$, $V_{2i}(r)$ – заданные распределения скоростей жидкой и твердой фаз на входе в трубчатый элемент; T_{BX}, P_{BX} – заданные значения температуры и давления среды на входе, $P_{ВЫХ}$ – заданное значение давления за стенкой фильтра. Решение системы уравнений (1)–(13) для граничных условий (15) представляет собой сложную проблему, связанную с большими математическими, вычислительными трудностями. В связи с этим, на основе обоснованных предположений, предлагается упрощенная модель процесса.

Для тонкослойных стенок и осадка вместо уравнений фильтрации через пористую стенку и осадок (10)–(13) можно принять следующие приближенные зависимости:

$$V_f^n = \frac{k}{\psi} \cdot \left(P_{|R_2 - \delta} - P_{ВЫХ} \right), \; T_m = T_0 = T_{CT} , \qquad (16)$$

здесь V_f – скорость фильтрования; k, ψ – коэффициенты проницаемости и кажущейся "вязкости" эффективной среды, которой является стенка фильтра и осадок.

Граничные условия на границе "область течения – поверхность осадка" примут следующий вид:

при $r = R_2 - \delta$: $U_1 = 0$, $\alpha_1 V_1 = V_f$, $U_2 = 0$, $T = T_{CT}$ (17)

Уравнения системы (1)–(8) являются нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных, которые в квадратурах не интегрируется. В связи с этим нелинейная система (1)–(8) решается с помощью модифицированного метода поверхностей равных расходов [4], предложенного в [11]. В поле течения для каждой фазы ($i = 1$ – жидкая фаза, $i = 2$ – твердая фаза) выбираются поверхности равных расходов (трубки тока) $r_{i\,k}(z)$ $(k = \overline{1, N})$, форма которых определяется геометрией сечения канала. Поверхности равных расходов $r_{i\,1}(z)$ и $r_{i\,N}(z)$ совпадают с поверхностями, ограничивающими область течения. Причем, если область течения среды есть круглая цилиндрическая труба, то линия тока $r_{i\,N}(z)$ совпадает с поверхностью осадка, а линия $r_{i\,1}(z)$ – с осью симметрии – линией – центром трубы. Задача о развитии течения среды сводится к численному определению положений поверхностей равных расходов, скоростей на них и давления. При отсутствии массообменных процессов изменения расхода сплошной фазы между введенными поверхностями определяются следующим образом

$$\Phi_{1k}(z) = \frac{d}{dz} \int_{r_{1k-1}}^{r_{1k}} 2 \cdot \pi \cdot \alpha_1 \cdot r \cdot U_1 \cdot dr, \qquad k = \overline{2, N}, \; (18)$$

После их дифференцирования по z не трудно показать, что при отсутствии массообмена имеют место соотношения:

$\Phi_{1k}(z) = 0, \qquad k = \overline{2, N-1},$

$\Phi_{1N}(z) = 2 \cdot \pi \cdot \alpha_1 \cdot (R_2 - \delta) \cdot V_1(z, R_2 - \delta).$

Уравнения для поверхностей равного расхода определим из (18). Для этого представим интеграл по одной из формул численного интегрирования и затем продифференцируем полученную разностную формулу по z. Если использовать формулу трапеции, то уравнения для определения линии тока примут вид

$$\frac{dr_{11}}{dz} = 0, \quad \frac{dr_{1k+1}}{dz} = \frac{dr_{1k}}{dz} + \frac{\Phi_{1\,k+1}}{\pi \Delta_{1k+1}} - \frac{r_{1k+1} - r_{1k}}{\Delta_{1k+1}} \frac{d\Delta_{1k+1}}{dz},$$

$$k = \overline{1, N-1} \qquad (19)$$

где $\Delta_{1k+1} = \alpha_1 (r_{1k+1} U_{1k+1} + r_{1k} U_{1k})$.

уравнение сохранения импульса (2) для жидкой фазы, на линиях тока $r_{i\,k}(z) \quad (k = \overline{1, N})$, после выполнения соответствующих преобразований запишется в виде системы дифференциальных уравнений:

$$U_{1\,k} \frac{dU_{1\,k}}{dz} = -\frac{\alpha_1}{\rho_1} \cdot \frac{dP}{dz} + \frac{1}{r_{1\,k}} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{\mu_1}{\rho_1} \cdot r_{1\,k} \cdot \frac{\partial U_{1\,k}}{\partial r} \cdot \left| \frac{\partial U_{1\,k}}{\partial r} \right|^{n-1} \right] - \frac{1}{\rho_1} \cdot F_{12,Z,\,k} + F_{Z,\,k}, \; k = \overline{1, N-1} \quad (20)$$

Аналогичные уравнения получим для второй фазы:

$$\frac{dr_{2\,1}}{dz} = 0, \; \frac{dr_{2\,k+1}}{dz} = \frac{dr_{2\,k}}{dz} + \frac{\Phi_{2\,k+1}}{\pi \Delta_{2\,k+1}} - \frac{r_{2\,k+1} - r_{2\,k}}{\Delta_{2\,k+1}} \frac{d\Delta_{2\,k+1}}{dz},$$

$$k = \overline{1, N-1} \qquad (21)$$

где $\Delta_{2\,k+1} = \alpha_2 (r_{2\,k+1} U_{2\,k+1} + r_{2\,k} U_{2\,k})$.

$$U_{2k} \frac{dU_{2k}}{dz} = -\frac{\alpha_2}{\rho_2} \cdot \frac{dP}{dz} + \frac{1}{\rho_2} \cdot F_{12,Z,k} + F_{Z,\,k} \qquad (22)$$

$k = \overline{1, N-1}$.

Значения поперечных скоростей определяются из соотношений, определяющих линии тока:

$V_{ik} = U_{ik} \dfrac{dr_{ik}}{dz}, \; i = 1 \, u \, 2, \quad k = \overline{2, N-1}$.

При решении системы уравнений (19)–(22) необходимо учитывать влияние температуры на вязкость жидкой фазы [12]. Для этого решение уравнения (9) с целью получения аналитических зависимостей ищется методом Слезкина [13].

Согласно этому методу конвективный член (левую часть) уравнения (9) заменим его средним значением по высоте области течения при помощи функции:

$$B(z) = \frac{c_p \cdot \rho}{\lambda} \cdot \frac{1}{R_2 - \delta} \int_0^{R_2 - \delta} \left(U \cdot \frac{\partial T}{\partial z} + V \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) dr \qquad (23)$$

Подставив в левую часть уравнения (9), получим уравнение:

$B(z) = \dfrac{1}{r} \cdot \dfrac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \dfrac{\partial T}{\partial r} \right)$. Проинтегрировав его с учетом граничных условий (15.1) и (17), получим для температуры выражение:

$$T(z, r) = T_{CT} + B(z) \cdot \frac{r^2 - (R_2 - \delta)^2}{4} \qquad (24)$$

В полученном выражении и при решении уравнений течения и фильтрации среды имеются две неизвестные величины $B(z)$ и $\delta(z,t)$. Для их определения используем соотношение (23) и уравнение баланса осадка. Далее выполнив соответствующие преобразования, получим линейное обыкновенное дифференциальное уравнение для $B(z)$:

$$\alpha \cdot B' + \beta \cdot B = \gamma, \qquad (25.1)$$

здесь:

$$\alpha = \sum_1^{N-1} \left(\frac{r_k^2 - (R_2 - \delta)^2}{4} \cdot V_k + \frac{r_{k+1}^2 - (R_2 - \delta)^2}{4} \cdot V_{k+1} \right) \cdot \Delta r_k,$$

$$\beta = \sum_1^{N-1} \left(\frac{U_k \cdot r_k + U_{k+1} \cdot r_{k+1}}{2} + \frac{\delta' \cdot (R_2 - \delta) \cdot (V_k + V_{k+1})}{2} \right) \cdot \Delta r_k -$$

$$- \frac{\lambda \cdot (R_2 - \delta)}{c_p \cdot \rho}, \; \gamma = - \sum_1^{N-1} (V_k + V_{k+1}) \cdot \Delta r_k \cdot T'_{CT}. \qquad (25.2)$$

Общим решением уравнения (25.2) является:

$$B(z) = \left[\int \frac{\gamma}{\alpha} \cdot e^{\int \beta / \alpha \cdot dz} \cdot dz + C \right] \cdot e^{-\int \beta / \alpha \cdot dz} \qquad (26)$$

Выведем уравнение для вычисления накопления осадка $\delta = \delta(z,t)$, меняющейся как по длине канала, так и по времени. Для этого построим уравнение баланса для толщины слоя осадка твердой фазы в элементарном объеме осадка, ограниченном сечениями z и $z + \Delta z$, и двумя поверхностями, полученными от вращения линий $r = R_2$ и $r = R_2 - \delta(z)$ вокруг оси фильтра.

Тогда после преобразований и выполнив предельный переход при $\Delta t \to 0$, получим уравнение баланса массы для слоя осадка

$$\frac{\delta(z,t)}{\partial t} = \frac{\alpha_2 \cdot (R_2 - \delta)}{\alpha_{20} \cdot R_2} \cdot \sqrt{1 + \delta_Z'^2} \cdot V_2(z, R_2 - \delta) \qquad (27)$$

Для средней по поперечному сечению канала объемной концентрации твердой фазы, присутствующей в построенной математической модели, из балансовых соотношений получим уравнение:

$$\frac{d\bar{\alpha}_2}{dz} = 2\pi \cdot (R_2 - \delta) \cdot V_f(z, R_2 - \delta) \cdot \bar{\alpha}_2 \Big/ \left[Q_2(z_н) + \int_{z_н}^{z} 2\pi \cdot (R_2 - \delta) \cdot V_f(z, R_2 - \delta) \cdot dz \right] \qquad (28)$$

Интегральное условие сохранения сплошной фазы для фильтра длиной L запишется в виде:

$$\int_0^{R_2-\delta} 2\pi\cdot\alpha_1\cdot U_1(z,r)\cdot r\cdot dr + \int_{z_н}^{L} 2\pi\cdot(R_2-\delta)\cdot V_f(z,R_2-\delta)\cdot dz = Q_{1н} \qquad (29)$$

Уравнение (29) позволяет определить длину фильтровального элемента, необходимой для полного разделения исходной суспензии при условии равенства нулю первого слагаемого. Второе слагаемое уравнения (29) определяет количество фильтрата при заданной длине фильтровального элемента L.

Математическая модель задачи представляет собой систему, состоящей из уравнений (14), (16), (19)–(22), (24), (27)–(29) , которые должны решаться совместно. Вычислительный алгоритм.

- В начальный момент времени $t = 0$ осадок отсутствует $\delta(z) = 0$.
- Во входном сечении $z_0 = z_н$: задаются значения давления P_{BX} , температуры суспензии T_{BX} , значение эффективной вязкости $m_0(T_{BX})$, выбираются распределения положений поверхностей равных расходов $r_{i\,k}(z)$ $(k = \overline{1,N})$ и соответствующие значения скоростей U_{ik} $(i = 1,2)$.
- Для следующего сечения $z_{j+1} = z_j + \Delta z$ численным методом равных расходов решается система обыкновенных дифференциальных уравнений (19)-(22), совместно с (14), (16), (24). При этом для сечения $z = z_j$, $j = 0,1,2,...$ по (19)-(22) вычисляются значения правых частей этих дифференциальных уравнений с использованием аппроксимаций выражений для скоростей по полной системе координатных функций с учетом граничных условий. Значение правой части дифференциального уравнения для давления, входящего в эту систему, определяется методом прогонки. В результате находятся искомые функции $r_{i\,k}(z)$ $(k = \overline{1,N})$ и U_{ik} $(i = 1,2)$, давление $P(z)$, температура $T(z, r_{1k})$, эффективная вязкость $m(T)$ на следующем шаге интегрирования по продольной координате. По найденному значению давления, из системы уравнений (16), (28) вычисляются скорость оттока сплошной фазы V_f, $\overline{\alpha}_2$.
- Процедура п. 3 повторяется до достижения конечного сечения канала $z = L$.
- Из уравнений (27) определяются распределения толщины осадков вдоль канала для следующего момента времени $t = t + \Delta t \le t_k$.

Для нового момента времени повторяются пункты 2–5.

- По вычислительному алгоритму проведены численные расчеты. На рис. 2–3 приведены результаты расчетов в виде графиков.

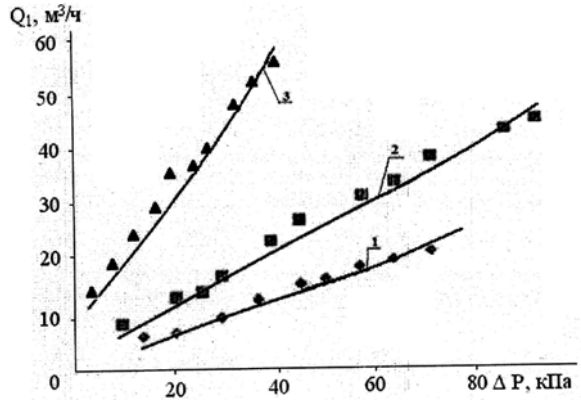

Рис. 2 Зависимость величины расхода фильтрата Q_l для суспензии раствора поливинилового спирта от перепада давления ΔP в фильтровальном узле из трех элементов ($\rho_l^0 = 1580кг/м^3$, $\rho_2^0 = 970\ кг/м^3$, $\mu_l = 2{,}5\times10^{-3}нс/м^2$, $\alpha_2 = 0{,}02$): 1 – зазор 100 мкм, $d_{ср} \approx 120мкм$; 2 – зазор 200 мкм, $d_{ср} \approx 240мкм$; 3 – зазор 500 мкм, $d_{ср} \approx 550мкм$

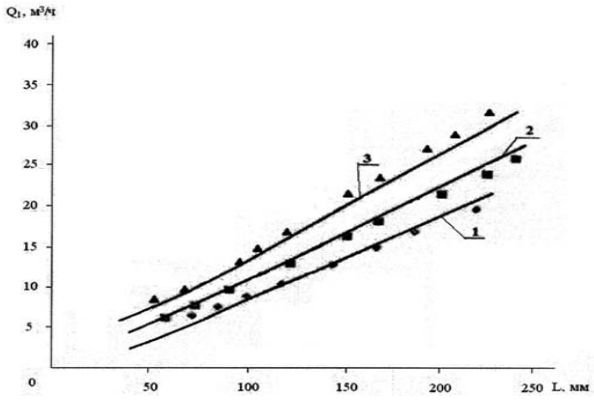

Рис. 3 Зависимость величины расхода фильтрата Q_l для суспензии раствора поливинилового спирта от длины L фильтрующего узла из трех элементов ($\rho_l^0 = 1580кг/м^3$, $\rho_2^0 = 970кг/м^3$, $\mu_l = 2{,}5\times10^{-3}нс/м^2$, $\alpha_2 = 0{,}02$): 1 – зазор 100 мкм, $d_{ср} \approx 120мкм$; 2 – зазор 200 мкм, $d_{ср} \approx 240мкм$; 3 – зазор 500 мкм, $d_{ср} \approx 550мкм$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена модификация метода равных расходов для расчета процессов течения и фильтрования двухфазной среды в трубчатых фильтрах в неизотермических условиях. Построенная математическая модель позволяет рассчитать процессы неизотермического течения двухфазных сред в каналах и трубах с проницаемыми стенками и определить все характеристики процесса разделения и размеры фильтра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фарахов М.И., Исянов Ч.Х., Кузнецов В.А., Сухов А.П., Шафиков И.С. Фильтрующий элемент (Варианты). Патент на изобретние № 2510728 (RU). 2014.

   Farakhov M.I., Isyanov C.H., Kuznetsov V.A., Sukhov A.P. Shafikov I.S. The filter element (Options). Patent № 2510728 (RU). 2014.

2. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч.1. М., 1987.

   Nigmatulin R.I. The dynamics of multiphase media. Part 1. M., 1987.

3. Ибятов Р.И., Холпанов Л.П., Ахмадиев Ф.Г., Бекбулатов И.Г. Математическое моделирование течения многофазной гетерогенной среды по проницаемой трубе // Теорет. основы хим. техноло-гии. 2005. Т. 39. № 5. С. 533.

   Ibyatov R.I., Kholpanov L.P., Akhmadiev F.G., Bekbulatov I.G. Mathematical modeling of the flow a multiphase heterogeneous medium in a per-meable tube // Theor. Found. of Chem. Eng. 2005. V. 39. No 5. P. 503. Pleiades Publishing. Lid. ISSN: 0040-5795.

4. Ахмадиев Ф.Г., Фазылзянов Р.Р., Галимов Р.А. Математическое моделирование тонкослойного неизотермического течения двухфазных сред по проницаемым поверхностям. // Теорет. основы хим. технологии. 2012. Т. 46. № 6. С. 620-630.

   Akhmadiev F.G., Fazylzyanov R.R., Galimov R.A. Mathematical Modeling of Non-Isothermal Thin-Film Two-Phase Flow over Permeable Surfaces // Theor. Found. of Chem. Eng. 2012. V. 46. № 6. P. 583-593. Pleiades Publishing. Lid. 2012. ISSN: 0040-5795.

5. Келбалиев Г.И. Коэффициенты сопротивления твердых частиц, капель и пузырей различной формы. // Теорет. основы хим. технологии. 2011. Т. 45. № 3. С. 264.

   Kelbaliyev G. I. Drag coefficients of variously shaped solid particles, drops, and bubbles. //Theor. Found. Chem. Eng. 2011. V. 45. № 3. P. 248-266.

6. Потанин А.А., Черномаз В.Е., Тараканов В.М., Урьев Н.Б. ИФЖ., 60, 1, 32, (1991).

   Potanin A.A. Chernomaz V.E. Tarakanov V.M. Uriev N.B. IJP., 60, 1, 32, (1991).

7. Acharya A., Mashelkar R.A., Ulbrecht J. Reol. Acta., 15, 9, 454, (1976).

8. Tanaka H., White J.L. J. of Non - Newt. Fluid. Mech., 7, 4, 333,(1980).

9. Шмаков Ю.И., Шмакова Л.М. Механика жидкостей и газа. Ташкент, 1980. С.77.

   Shmakov, Y.I., Shmakov L.M. Gas and fluid mechanics. Tashkent, 1980. P.77.

10. Иванов В.А. Процессы тепло- и массопереноса вязкой жидкости. Уральский научный центр АН СССР. 1986. С.79.

    Ivanov V.A. The processes of heat and mass transfer of a viscous liquid. Ural Scientific Center of the USSR. 1986. P.79.

11. Холпанов Л.П., Шкадов В.Я. Гидродинамика и тепломассообмен с поверхностью раздела. М.: Наука, 1990.

    Kholpanov L.P. Shkadov V.J. Hydrodynamics and heat and mass transfer with the interface. M .: Science, 1990.

12. Кадыйров А.И., Вачагина Е.К. Вестник Казанского Технологического Университета, 16, 19, 49-53, (2012).

    Kadyirov A.I., Vachagina E.K. Vestnik of the Kazan Technological University, 16, 19, 49-53, (2012).

13. Тарг С.М., Основные задачи теории ламинарных течений. – М.: ГИТТЛ, 1951. – 420с.

    Targ S.M., The main task of the theory of laminar flows. - M .: SPTTL, 1951. - 420C.