Чистяков Александр Евгеньевич, Фоменко Наталья Алексеевна

ПОСТРОЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗНОСТНЫХ СХЕМ, УЧИТЫВАЮЩИХ СТЕПЕНЬ ЗАПОЛНЕННОСТИ КОНТРОЛЬНОГО ОБЪЕМА ДЛЯ ЗАДАЧИ ДИФФУЗИИ-КОНВЕКЦИИ-РЕАКЦИИ

В работе предложен вариант интегро-интерполяционного метода, учитывающий степень заполненности контрольных ячеек. Показано, что представленные аппроксимации имеют второй порядок погрешности по пространственной переменной. Приведено описание дискретной математической модели транспорта веществ, устойчивость которой проверена на основе сеточного принципа максимума. Предложенные сеточные уравнения записаны в канонической форме. Проверено условие применимости сеточного принципа максимума и показана условная устойчивость разностных схем по начальным данным, граничным условиям и правой части, представлена консервативность оператора диффузионного переноса.

Адрес статьи: www.gramota.net/materials/1/2013/1/52.html

Источник

Альманах современной науки и образования

Тамбов: Грамота, 2013. № 1 (68). C. 174-178. ISSN 1993-5552.

Адрес журнала: www.gramota.net/editions/1.html

Содержание данного номера журнала: www.gramota.net/materials/1/2013/1/

УДК 519.6
Физико-математические науки

В работе предложен вариант интегро-интерполяционного метода, учитывающий степень заполненности контрольных ячеек. Показано, что представленные аппроксимации имеют второй порядок погрешности по пространственной переменной. Приведено описание дискретной математической модели транспорта веществ, устойчивость которой проверена на основе сеточного принципа максимума. Предложенные сеточные уравнения записаны в канонической форме. Проверено условие применимости сеточного принципа максимума и показана условная устойчивость разностных схем по начальным данным, граничным условиям и правой части, представлена консервативность оператора диффузионного переноса.

Ключевые слова и фразы: сеточные уравнения; уравнение диффузии-конвекции-реакции; аппроксимация; устойчивость; консервативность.

Александр Евгеньевич Чистяков, к. ф.-м. н.
Наталья Алексеевна Фоменко
Кафедра высшей математики
Южный федеральный университет
cheese_05@mail.ru; fomenko.n86@mail.ru

ПОСТРОЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗНОСТНЫХ СХЕМ, УЧИТЫВАЮЩИХ СТЕПЕНЬ ЗАПОЛНЕННОСТИ КОНТРОЛЬНОГО ОБЪЕМА ДЛЯ ЗАДАЧИ ДИФФУЗИИ-КОНВЕКЦИИ-РЕАКЦИИ©

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (грант № 14.A18.21.0680).

Введение. При численном моделировании физических процессов часто приходится решать задачу диффузии-конвекции-реакции. Для построения разностных схем, как правило, используется интегро-интерполяционный метод. В работе предложен вариант данного метода, в котором учитывается степень заполненности (заполненность) контрольных ячеек, а также предложены аппроксимации операторов диффузионного и конвективного переноса. В случае отсутствия учета частичной заполненности ячеек решение имеет «дефекты», связанные со ступенчатым представлением границы области на прямоугольной сетке. В то же время алгоритм расчета, учитывающий частичную заполненность ячеек, лишен этого недостатка. Таким образом, удается добиться повышения реальной точности решения в случае сложной геометрии исследуемой области за счет улучшения аппроксимации границы.

Постановка задачи. Рассмотрим задачу транспорта веществ, которая может быть представлена уравнением диффузии-конвекции-реакции:

$$c'_t + uc'_x + vc'_y = \left(\mu c'_x\right)'_x + \left(\mu c'_y\right)'_y + f \tag{1}$$

с граничными условиями:

$$c'_n(x,y,t) = \alpha_n c + \beta_n , \tag{2}$$

где u,v - компоненты вектора скорости, μ - коэффициент турбулентного обмена, f - функция, описывающая интенсивность и распределение источников.

Построение дискретной модели. Расчетная область вписана в прямоугольник. Для численной реализации дискретной математической модели поставленной задачи вводится равномерная сетка:

$$w_h = \{t^n = n\tau, x_i = ih_x, y_j = jh_y;\quad n = \overline{0..N_t}, i = \overline{0..N_x}, j = \overline{0..N_y};$$
$$N_t\tau = T, N_x h_x = l_x, N_y h_y = l_y\},$$

где τ - шаг по времени, h_x, h_y - шаги по пространству, N_t - верхняя граница по времени, N_x, N_y - границы по пространству.

Для аппроксимации уравнения (1) по временной координате используем схемы с весами [2; 10]

$$\frac{\hat{c}-c}{\tau} + u\bar{c}'_x + v\bar{c}'_y = \left(\mu\bar{c}'_x\right)'_x + \left(\mu\bar{c}'_y\right)'_y + f , \tag{3}$$

где $\bar{c} = \sigma\hat{c} + (1-\sigma)c$, $\sigma \in [0,1]$ - вес схемы.

Ячейки представляют собой прямоугольники, они могут быть заполненными, частично заполненными или пустыми. Центры ячеек и узлы разнесены на $h_x/2$ и $h_y/2$ по координатам x и y соответственно.

Обозначим через $o_{i,j}$ заполненность ячейки (i,j). В окрестности узла (i,j) лежат ячейки (i,j), $(i+1,j)$, $(i,j+1)$, $(i+1,j+1)$.

Вводятся коэффициенты q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, описывающие заполненность контрольных областей, находящихся в окрестности ячейки [6]. Значение q_0 характеризует заполненность области D_0: $x\in\left(x_{i-1/2},x_{i+1/2}\right)$, $y\in\left(y_{j-1/2},y_{j+1/2}\right)$, q_1 - D_1: $x\in\left(x_i,x_{i+1/2}\right)$, $y\in\left(y_{j-1/2},y_{j+1/2}\right)$, q_2 - D_2: $x\in\left(x_{i-1/2},x_i\right)$, $y\in\left(y_{j-1/2},y_{j+1/2}\right)$, q_3 - D_3: $x\in\left(x_{i-1/2},x_{i+1/2}\right)$, $y\in\left(y_j,y_{j+1/2}\right)$, q_4 - D_4: $x\in\left(x_{i-1/2},x_{i+1/2}\right)$, $y\in\left(y_{j-1/2},y_j\right)$. Заполненные части областей D_m будем называть Ω_m, где $m=\overline{0..4}$. В соответствии с этим коэффициенты q_m можно вычислить по формулам:

$$\left(q_m\right)_{i,j}=\frac{S_{\Omega_m}}{S_{D_m}},\ \left(q_0\right)_{i,j}=\frac{o_{i,j}+o_{i+1,j}+o_{i+1,j+1}+o_{i,j+1}}{4},\ \left(q_1\right)_{i,j}=\frac{o_{i+1,j}+o_{i+1,j+1}}{2},$$

$$\left(q_2\right)_{i,j}=\frac{o_{i,j}+o_{i,j+1}}{2},\ \left(q_3\right)_{i,j}=\frac{o_{i+1,j+1}+o_{i,j+1}}{2},\ \left(q_4\right)_{i,j}=\frac{o_{i,j}+o_{i+1,j}}{2}$$

После проведения ряда преобразований дискретный аналог уравнения диффузии-конвекции-реакции (1) с граничными условиями третьего рода (2) будет иметь следующий вид:

$$\begin{gathered}\left(q_0\right)_{i,j}\frac{\hat{c}_{i,j}-c_{i,j}}{\tau}+\left(q_1\right)_{i,j}u_{i+1/2,j}\frac{\bar{c}_{i+1,j}-\bar{c}_{i,j}}{2h_x}+\left(q_2\right)_{i,j}u_{i-1/2,j}\frac{\bar{c}_{i,j}-\bar{c}_{i-1,j}}{2h_x}+\\
+\left(q_3\right)_{i,j}v_{i,j+1/2}\frac{\bar{c}_{i,j+1}-\bar{c}_{i,j}}{2h_y}+\left(q_4\right)_{i,j}v_{i,j-1/2}\frac{\bar{c}_{i,j}-\bar{c}_{i,j-1}}{2h_y}=\left(q_1\right)_{i,j}\mu_{i+1/2,j}\frac{\bar{c}_{i+1,j}-\bar{c}_{i,j}}{h_x^2}-\\
-\left(q_2\right)_{i,j}\mu_{i-1/2,j}\frac{\bar{c}_{i,j}-\bar{c}_{i-1,j}}{h_x^2}-\left|\left(q_1\right)_{i,j}-\left(q_2\right)_{i,j}\right|\mu_{i,j}\frac{\alpha_x\bar{c}_{i,j}+\beta_x}{h_x}+\\
+\left(q_3\right)_{i,j}\mu_{i,j+1/2}\frac{\bar{c}_{i,j+1}-\bar{c}_{i,j}}{h_y^2}-\left(q_4\right)_{i,j}\mu_{i,j-1/2}\frac{\bar{c}_{i,j}-\bar{c}_{i,j-1}}{h_y^2}-\left|\left(q_3\right)_{i,j}-\left(q_4\right)_{i,j}\right|\mu_{i,j}\frac{\alpha_y\bar{c}_{i,j}+\beta_y}{h_y}+\left(q_0\right)_{i,j}f_{i,j}\end{gathered}\tag{4}$$

Таким образом, получили дискретные аналоги операторов конвективного и диффузионного переноса в случае частичной заполненности ячеек.

Аппроксимация операторов диффузии-конвекции. Рассмотрим дискретные аналоги операторов конвективного uc'_x и диффузионного переноса $\left(\mu c'_x\right)'_x$ в случае частичной заполненности ячеек, которые могут быть записаны в следующем виде:

$$\left(q_0\right)_{i,j}uc'_x\simeq\left(q_1\right)_{i,j}u_{i+1/2,j}\frac{c_{i+1,j}-c_{i,j}}{2h_x}+\left(q_2\right)_{i,j}u_{i-1/2,j}\frac{c_{i,j}-c_{i-1,j}}{2h_x}\tag{5}$$

$$\begin{gathered}\left(q_0\right)_{i,j}\left(\mu c'_x\right)'_x\simeq\left(q_1\right)_{i,j}\mu_{i+1/2,j}\frac{c_{i+1,j}-c_{i,j}}{h_x^2}-\left(q_2\right)_{i,j}\mu_{i-1/2,j}\frac{c_{i,j}-c_{i-1,j}}{h_x^2}-\\
-\left|\left(q_1\right)_{i,j}-\left(q_2\right)_{i,j}\right|\mu_{i,j}\frac{\alpha_x c_{i,j}+\beta_x}{h_x},\end{gathered}\tag{6}$$

где q_0, q_1, q_2 - заполненности контрольных областей, α,β - коэффициенты, стоящие в граничных условиях.

Для определения погрешности аппроксимации выражений (5)-(6) будем доопределять расчетную область. Выражение (5) можно рассмотреть в случае $\left(q_1\right)_{i,j}=\left(q_2\right)_{i,j}=1$, при этом можно утверждать, что погрешность аппроксимации полученного выражения равна погрешности исходного выражения. Влияние граничных условий учитывается в выражении (6). Для определения погрешности аппроксимации выражения (6) нужно рассмотреть два случая: первый случай не учитывает влияния границы $\left(q_1\right)_{i,j}=\left(q_2\right)_{i,j}=1$, второй случай учитывает $\left(q_1\right)_{i,j}=1$; $\left(q_2\right)_{i,j}=0$, т.к. аппроксимация (6) может быть записана через линейную комбинацию аппроксимаций, полученных в этих двух случаях. Таким образом, получим, что для определения погрешностей аппроксимаций выражений (5)-(6) достаточно исследовать на точность следующие аппроксимации:

- дискретный аналог оператора конвективного переноса в случае отсутствия влияния границы области

$$uc'_x\simeq u_{i+1/2,j}\frac{c_{i+1,j}-c_{i,j}}{2h_x}+u_{i-1/2,j}\frac{c_{i,j}-c_{i-1,j}}{2h_x};\tag{7}$$

- дискретный аналог оператора диффузионного переноса в случае отсутствия влияния границы области

$$\left(\mu c'_x\right)'_x\simeq\mu_{i+1/2,j}\frac{c_{i+1,j}-c_{i,j}}{h_x^2}-\mu_{i-1/2,j}\frac{c_{i,j}-c_{i-1,j}}{h_x^2};\tag{8}$$

- дискретный аналог оператора диффузионного переноса в случае наличия влияния границы области

$$\left(\mu c_x'\right)_x' / 2 \simeq \mu_{i+1/2,j} \frac{c_{i+1,j} - c_{i,j}}{h_x^2} - \mu_{i,j} \frac{\alpha_x c_{i,j} + \beta_x}{h_x} \quad (9)$$

Погрешность аппроксимации оператора диффузии-конвекции. Найдем погрешность аппроксимации выражения (7), для этого воспользуемся разложением в ряд Тейлора относительно узла (i, j) значения функций в узлах $(i+1, j)$ и $(i-1, j)$

$$c_{i+1,j} = c_{i,j} + \left(c_{i,j}\right)' h_x + \left(c_{i,j}\right)'' \frac{h_x^2}{2} + O\left(h_x^3\right) \quad (10)$$

$$c_{i-1,j} = c_{i,j} - \left(c_{i,j}\right)' h_x + \left(c_{i,j}\right)'' \frac{h_x^2}{2} + O\left(h_x^3\right) \quad (11)$$

Подставим выражения (10)-(11) в аппроксимацию (7), в результате чего получим:

$$uc_x' \simeq \frac{u_{i+1/2,j} + u_{i-1/2,j}}{2}\left(c_{i,j}\right)' + \frac{u_{i+1/2,j} - u_{i-1/2,j}}{4}\left(c_{i,j}\right)'' h_x + O\left(h_x^2\right)$$

Принимая во внимания следующие выражения

$u_{i+1/2,j} + u_{i-1/2,j} = 2u_{i,j} + O\left(h_x^2\right)$, $u_{i+1/2,j} - u_{i-1/2,j} = O\left(h_x\right)$,

получим

$$u_{i+1/2,j} \frac{c_{i+1,j} - c_{i,j}}{2h_x} + u_{i-1/2,j} \frac{c_{i,j} - c_{i-1,j}}{2h_x} = u_{i,j}\left(c_{i,j}\right)' + O\left(h_x^2\right) \quad (12)$$

Найдем погрешность аппроксимации выражения (8), для этого воспользуемся разложением в ряд Тейлора относительно узла (i, j) значений функции c в узлах $(i+1, j)$ и $(i-1, j)$

$$c_{i+1,j} = c_{i,j} + \left(c_{i,j}\right)' h_x + \left(c_{i,j}\right)'' \frac{h_x^2}{2} + \left(c_{i,j}\right)''' \frac{h_x^3}{6} + O\left(h_x^4\right) \quad (13)$$

$$c_{i-1,j} = c_{i,j} - \left(c_{i,j}\right)' h_x + \left(c_{i,j}\right)'' \frac{h_x^2}{2} - \left(c_{i,j}\right)''' \frac{h_x^3}{6} + O\left(h_x^4\right) \quad (14)$$

Подставим выражения (13)-(14) в аппроксимацию (7), в результате чего получим:

$$\left(\mu c_x'\right)_x' \simeq \frac{\mu_{i+1/2,j} - \mu_{i-1/2,j}}{h_x}\left(c_{i,j}\right)' + \frac{\mu_{i+1/2,j} + \mu_{i-1/2,j}}{2}\left(c_{i,j}\right)'' + \left(\mu_{i+1/2,j} - \mu_{i-1/2,j}\right)\left(c_{i,j}\right)''' \frac{h_x}{6} + O\left(h_x^2\right)$$

Принимая во внимания следующие выражения

$\mu_{i+1/2,j} + \mu_{i-1/2,j} = 2\mu_{i,j} + O\left(h_x^2\right)$, $\mu_{i+1/2,j} - \mu_{i-1/2,j} = \left(\mu_{i,j}\right)' h_x + O\left(h_x^2\right)$,

получим

$$\mu_{i+1/2,j} \frac{c_{i+1,j} - c_{i,j}}{h_x^2} - \mu_{i-1/2,j} \frac{c_{i,j} - c_{i-1,j}}{h_x^2} = \left(\mu_{i,j}\left(c_{i,j}\right)'\right)' + O\left(h_x^2\right) \quad (15)$$

Каноническая форма сеточных уравнений. Для исследования устойчивости воспользуемся принципом максимума. Для этого запишем исходную дискретную модель транспорта веществ, описываемую уравнением диффузии-конвекции с граничными условиями третьего рода (4) в каноническом виде.

$$L\left(c(P)\right) = A(P)c(P) - \sum_{Q \in Ш'(P)} B(P,Q)c(Q) = F(P), \quad (16)$$

где L - некоторый сеточный оператор, $P \equiv \left(x_i, y_j\right)$ - центр шаблона,

$Ш'(P) = \left\{Q_1\left(x_{i+1}, y_j\right), Q_2\left(x_{i-1}, y_j\right), Q_3\left(x_i, y_{j+1}\right), Q_4\left(x_i, y_{j-1}\right)\right\}$ - окрестность центра шаблона.

Достаточные условия устойчивости. Условием применимости принципа максимума являются:

$$A(P) > 0,\ B(P,Q) > 0,\ D(P) = A(P) - \sum_{Q \in Ш'(P)} B(P,Q) \geq 0 \quad (17)$$

Данное условие является достаточным для монотонности разностных схем. Проверим условие применимости принципа максимума. Из положительности коэффициентов стоящих в окрестности центра шаблона

$$B\left(P,Q_i\right) = \sigma\left(\pm\frac{u\left(Q_i\right) + u(P)}{4h_x} + \frac{\mu\left(Q_i\right) + \mu(P)}{2h_x^2}\right)q_i(P) > 0,\ i = \overline{1,4}$$

следует

$$h_x < 2\min\left(\mu / |u|\right) \leq 2\frac{\mu\left(Q_i\right) + \mu(P)}{\left|u\left(Q_i\right) + u(P)\right|} \quad (18)$$

Ограничения на шаг по времени имеют вид:

$$\tau < \left(-(1-\sigma)\frac{\left(u(P)\right)_x + \left(v(P)\right)_y}{2} + (1-\sigma)\frac{2\min\left(\mu(P)\right)}{h_x^2} - \right.$$

$$\left. -\frac{(1-\sigma)}{q_0(P)}\left(\left|q_1(P) - q_2(P)\right|\frac{\alpha_x}{h_x} + \left|q_3(P) - q_4(P)\right|\frac{\alpha_y}{h_y} \right)\mu(P) \right)^{-1}$$

В случае неявной схемы ($\sigma = 1$) отсутствует ограничение на шаг по временной координате. Условием монотонности явной схемы для уравнения диффузии в случае граничных условий первого и второго рода является: $\tau < h_x^2 / \left(2\min\left(\mu(P)\right)\right)$.

Проверка устойчивости. Согласно принципу максимума выполнения условий (3), имеет место следующая оценка:

$$\left\|\hat{c}\right\|_c \le \left\|F / D\right\|_c ,$$

где F - значение функции, стоящей в правой части сеточного уравнения, D - диагональное преобладание.

Следовательно, для исходного уравнения имеет место оценка:

$$\left\|c^{n+1}\right\|_c \le \left\|c^0\right\|_c + \tau\sum_{k=0}^{n}\left\|f^k\right\|_c + \left\| \frac{\left|q_1(P) - q_2(P)\right|\frac{\beta_x}{h_x} + \left|q_3(P) - q_4(P)\right|\frac{\beta_y}{h_y}}{\left|q_1(P) - q_2(P)\right|\frac{\alpha_x}{h_x} + \left|q_3(P) - q_4(P)\right|\frac{\alpha_y}{h_y}} \right\|_c$$

Из полученного выражения следует устойчивость исследуемых математических моделей волновых процессов по начальным данным, граничным условиям и правой части.

Консервативность. Консервативность операторов конвективного и диффузионного переноса будем рассматривать на основе дискретной модели транспорта веществ, описываемую уравнением диффузии-конвекции с граничными условиями третьего рода (4).

Проверим баланс вещества. Для этого просуммируем уравнение (4) по всей расчетной области с учетом $c_{i+1/2,j} = \left(c_{i+1,j} + c_{i,j}\right)/2$, в результате чего получим

$$\sum_{\substack{i\in[1,N_x-1],\\ j\in[1,N_y-1]}} (q_0)_{i,j}\,\hat{c}_{i,j} = \sum_{\substack{i\in[1,N_x-1],\\ j\in[1,N_y-1]}} (q_0)_{i,j}\,c_{i,j} + \sum_{\substack{i\in[1,N_x-1],\\ j\in[1,N_y-1]}} \tau(q_0)_{i,j}\left(u_x + v_y\right)_{i,j}\overline{c}_{i,j} +$$

$$+\sum_{\substack{i\in[1,N_x-1],\\ j\in[1,N_y-1]}} \tau\left(\left|(q_1)_{i,j} - (q_2)_{i,j}\right|\mu_{i,j}\frac{\alpha_x\overline{c}_{i,j} + \beta_x}{h_x} + \left|(q_3)_{i,j} - (q_4)_{i,j}\right|\mu_{i,j}\frac{\alpha_y\overline{c}_{i,j} + \beta_y}{h_y} \right) + \tau\sum_{\substack{i\in[1,N_x-1],\\ j\in[1,N_y-1]}} (q_0)_{i,j}\,f_{i,j}\,, \qquad (19)$$

где u_x, v_y - операторы первой разностной производной.

Из полученного равенства следует, что оператор диффузии не вносит вклад в суммарную концентрацию вещества. Оператор конвективного переноса не является консервативным в случае невыполнения условия несжимаемости среды $u_x + v_y = 0$. Если среда сжимается (расширяется), то концентрация увеличивается (уменьшается), что иногда удобно при моделировании реальных физических процессов.

Выводы. При использовании подобной методики получаются достаточно гладкие решения даже на грубых сетках. Такой подход имеет ряд преимуществ по сравнению с методами, использующими σ-сетки. Во-первых, предлагаемый в статье метод позволяет проводить аппроксимацию на структурированных сетках, для которых расчетные узлы расположены в центрах контрольного объема, что позволяет получить более точную аппроксимацию. Во-вторых, данный подход более прост в реализации по сравнению с методами, использующими σ-сетки, при тех же условиях применимости, что позволяет строить более сложные модели.

Список литературы

1. **Коновалов А. Н.** К теории попеременно-треугольного итерационного метода // Сибирский математический журнал. 2002. Т. 43. № 3. С. 552-572.
2. **Самарский А. А.** Теория разностных схем. М.: Наука, 1989.
3. **Самарский А. А., Николаев Е. С.** Методы решения сеточных уравнений. М.: Наука, 1978.
4. **Сухинов А. И.** Прецизионные модели гидродинамики и опыт применения в предсказании и реконструкции чрезвычайных ситуаций в Азовском море // Известия ТРТУ. 2006. № 3 (58). С. 228-235.
5. **Сухинов А. И., Никитина А. В., Чистяков А. Е.** Моделирование сценария биологической реабилитации Азовского моря // Математическое моделирование. 2012. Т. 24. № 9. С. 3-21.
6. **Сухинов А. И., Тимофеева Е. Ф., Чистяков А. Е.** Построение и исследование дискретной математической модели расчета прибрежных волновых процессов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. № 8 (121). С. 22-32.
7. **Сухинов А. И., Чистяков А. Е.** Адаптивный модифицированный попеременно-треугольный итерационный метод для решения сеточных уравнений с несамосопряженным оператором // Математическое моделирование. 2012. Т. 24. № 1. С. 3-20.

8. **Сухинов А. И., Чистяков А. Е.** Параллельная реализация трехмерной модели гидродинамики мелководных водоемов на супервычислительной системе // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. 2012. Т. 13. С. 290-297.
9. **Сухинов А. И., Чистяков А. Е., Алексеенко Е. В.** Численная реализация трехмерной модели гидродинамики для мелководных водоемов на супервычислительной системе // Математическое моделирование. 2011. Т. 23. № 3. С. 3-21.
10. **Сухинов А. И., Чистяков А. Е., Бондаренко Ю. С.** Оценка погрешности решения уравнения диффузии на основе схем с весами // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. № 8 (121). С. 6-13.
11. **Сухинов А. И., Чистяков А. Е., Проценко Е. А.** Построение дискретной двумерной математической модели транспорта наносов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. № 8 (121). С. 32-44.
12. **Фоменко Н. А.** Моделирование гидродинамических процессов при обтекании корпуса судна // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. № 8 (121). С. 139-147.
13. **Чистяков А. Е.** Об аппроксимации граничных условий трехмерной модели движения водной среды // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 6 (107). С. 66-77.
14. **Чистяков А. Е.** Теоретические оценки ускорения и эффективности параллельной реализации ПТМ скорейшего спуска // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 6 (107). С. 237-249.

УДК 51
Технические науки

Метод последовательной перекачки нефтей и нефтепродуктов заключается в том, что в магистральный трубопровод последовательно и непрерывно закачиваются отдельные партии нефтей или нефтепродуктов, различных по своим качественным показателям. Достоинства метода - равномерная поставка разносортных продуктов потребителю, разгрузка железнодорожного транспорта. Недостаток - образование технологической смеси, которая для своего исправления требует дополнительных ресурсов. Теоретические закономерности смесеобразования наиболее полно разработаны для продуктов, отличающихся по плотности и вязкости. Если в будущем, в связи с разработкой северных месторождений, будет востребована последовательная перекачка нефтей, разных по классу и типу, то уравнение по определению объема смеси должно быть откорректировано для новых условий.

Ключевые слова и фразы: нефть; нефтепродукты; последовательная перекачка; смесеобразование; технологическая смесь; объем смеси; компаундирование.

Ирина Семеновна Шабуро, к.т.н.
Кафедра «Трубопроводный транспорт»
Самарский государственный технический университет
tt@samgtu.ru

Юлия Викторовна Терехина
АК «Транснефть» ОАО «МН "Дружба"»
tt@samgtu.ru

НЕКОТОРЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ОСНОВНОГО УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОБЪЕМА СМЕСИ, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ В ПРОЦЕССЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ПЕРЕКАЧКИ НЕФТЕЙ И НЕФТЕПРОДУКТОВ МЕТОДОМ ПРЯМОГО КОНТАКТИРОВАНИЯ©

Последовательная перекачка нефтей, нефтепродуктов по магистральным трубопроводам методом прямого контактирования предполагает закладку в трубопровод последовательно и непрерывно различных по качественным показателям нефтей или нефтепродуктов отдельными партиями определенного объема. При этом обеспечивается максимальная загрузка трубопровода, равномерная поставка различных нефтепродуктов потребителю на всей протяженности магистрального трубопровода, разгружается железнодорожный транспорт, особенно в зимний период времени. Такой метод перекачки разносортных нефтей позволяет готовить нефть нужного качества как головной ЛПДС, так и на любой промежуточной станции или на конечном пункте с резервуарными парками, куда была прокачена нефть с показателями качества, не отвечающими требованиям потребителя, и которую необходимо довести до показателей качества, позволяющих ее откачку в МНП или отгрузку в другие виды транспорта. В случае нефтепродуктов последовательная перекачка позволяет поставлять их для внутренних нужд народного хозяйства и на экспорт в достаточно широком ассортименте. Однако при последовательной перекачке продуктов, которые отличаются по плотности, вязкости, содержанию серы или по другим характеристикам, этот метод перекачки имеет существенный недостаток. В зоне контакта двух, следующих внутри трубопровода друг за другом нефтей или нефтепродуктов, образуется технологическая смесь, т.е. смесь, образование которой предотвратить невозможно.