

ЧИСЕЛЬНИЙ МЕТОД РЕАЛІЗАЦІЇ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСІВ ПЕРВИННОЇ ПЕРЕРОБКИ СИРИХ ВУГЛЕВОДНІВ

Ю. В. Григоренко

Одеський національний політехнічний університет,
просп. Шевченко, 1, Одеса, 65044, Україна, e-mail: ygrygorenko@lukoil.com

Виконано узагальнення математичного опису процесів первинної переробки сирих вуглеводнів (ППСВ) у вигляді нелінійних нестационарних диференційних рівнянь у часткових похідних, що дає змогу застосувати принцип типізації при подальшому математичному моделюванні зазначених процесів. Запропоновано та обґрунтовано ефективний чисельний метод реалізації математичних моделей (ММ) процесів ППСВ, заснований на ітераційній процедурі розв'язання нелінійних нестационарних дискретних ММ досліджуваних процесів.

Ключові слова: математична модель, ітераційний процес, різницева схема, параметрична нелінійність, збіжність ітераційної процедури, стислість відображення

Вступ

Розв'язок задачі математичного моделювання, в тому числі при дослідженні процесів переробки сирих вуглеводнів, в значній мірі визначається обраною ММ. Адекватно обрана ММ забезпечує достовірність результатів математичного моделювання. Крім того, на результати математичного моделювання (зокрема, його точність) впливають чисельні методи, якими реалізується обрана ММ. Тому сукупний вибір ММ та чисельного методу є важливим етапом математичного моделювання, що визначає ефективність процесу дослідження.

В роботі [1] запропоновано ММ процесів (та апаратів) ППСВ у вигляді диференційних рівнянь (систем диференційних рівнянь) у часткових похідних (ДРЧП), отриманих на основі фундаментальних законів матеріального балансу та збереження (енергії, імпульсу, тощо). Адекватність запропонованої сукупності ММ визначається тим, що вони найбільш повно відбивають характер фізико-хімічних явищ, притаманних досліджуваному класу процесів. Особливістю запропонованих ММ є те, що вони мають нелінійний та нестационарний характер, що визначається відповідною варіативністю параметрів сирих вуглеводнів. Наприклад, густина сирової нафти в значній мірі залежить від температури, що призводить до нелінійності ММ, а зміна в часі функції стану сировини в ході технологічного процесу (наприклад, тієї ж температури сирової нафти), зумовлює не стационарність ММ.

Постановка задачі та мети дослідження

Однак слід зазначити, що існуючі чисельні методи [2, 3] не забезпечують у повній мірі ефективну реалізацію нелінійних нестационарних ММ процесів ППСВ.

Метою запропонованої роботи є розробка ефективного чисельного методу реалізації ММ процесів ППСВ, який передбачає застосування принципу типізації ММ.

Основна частина

Запропоновані в роботі [1] ММ можна представити у вигляді узагальненої моделі, а саме:

$$\frac{\partial \bar{\Phi}_i(r_j, z, t)}{\partial t} = f_i \left[\bar{\Phi}_i(r_j, z, t), \frac{\partial \bar{\Phi}_i(r_j, z, t)}{\partial z}, \frac{\partial^2 \bar{\Phi}_i(r_j, z, t)}{\partial r_j^2}, \frac{\partial \bar{\Phi}_i(r_j, z, t)}{\partial r_j}, \bar{U}_g(r_j, z, t) \right] + D_i(\bar{\Phi}_i, r_j, z, t), \quad (1)$$

$$\forall i = 1, \dots, k; \forall j = 1, \dots, N; \forall (r_j, z) \in \Omega; \forall t \in (0, t_k),$$

$$\bar{\Phi} = [\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_k]^T \quad (T \text{ — знак транспонування})$$

з урахуванням початкових

$$\bar{\Phi}_i(r_j, z, 0) = \bar{\Phi}_{i_0}(r_j, z), \forall i = 1, \dots, k; \forall j = 1, \dots, N; \forall (r_j, z) \in \Omega \quad (2)$$

та граничних умов наступних типів:

- граничних умов першого роду, ГУ-1 (типу Діріхле)

$$\bar{\Phi}_i(r_j, z, t) \Big|_{\substack{r_i=0 \\ z=0 \\ z=z_{\max}}}^{r_i=r_{i\max}} = \varphi_i [P_i(r_j, z, t)], \forall i = 1, \dots, k; \forall j = 1, \dots, N; \forall (r_j, z) \in \Omega \quad (3)$$

- граничних умов третього роду, ГУ-3

$$\frac{\partial \bar{\Phi}_i(r_j, z, t)}{\partial r_i} \Big|_{\substack{r_i=0 \\ r_i=r_{i\max}}} = \lambda_i [\bar{\Phi}_i(r_j, z, t), P_i(r_j, z, t)], \quad (4)$$

$$\forall i = 1, \dots, k; \forall j = 1, \dots, N; \forall (r_j, z) \in \Omega,$$

де $\bar{\Phi}_i(r_j, z, t)$ — безперервні функції стану, що залежать від часової $t \in (0, t_k)$ та просторових $\forall (r_j, z) \in \Omega$ координат (координати r_j, z змінюються у відкритій (циліндричній) множині $\Omega \in R^{M_k}$ із гладкою границею $\partial\Omega$; R^{M_k} — евклідовий простір дійсних чисел розмірності M_k); функції стану $\bar{\Phi}_i(r_j, z, t)$ визначаються розв'язком системи (1) — (4), що (за визначенням) існує і є єдиним; $\bar{U}_g(r_j, z, t), g = 1, \dots, k^*$ — функції розподіленого управління, що належать гільбертовому простору \bar{U}_{g_0} на R^{M_k} .

Змінні стану $\bar{\Phi}_i(r_j, z, t)$ та управління $\bar{U}_g(r_j, z, t)$ визначено у відкритих гільбертових просторах із границями відповідно $\Omega_{\Phi_i}, \Omega_{U_r}, \forall i = 1, \dots, k; \forall r = 1, \dots, k^*$.

Функції $f_i[\cdot]$ та $y_i[\cdot]$ — безперервні лінійні або нелінійні функції; $D_i(\bar{\Phi}_i, r_j, z, t) = D_i\{r_i, z, t, \Phi_1(r_j, z, t), \Phi_2(r_j, z, t), \dots, \Phi_k(r_j, z, t)\}$ — лінійні або нелінійні функції, що характеризують дію зовнішніх збуджуючих впливів; $P_i(r_j, z, t), \forall i = 1, \dots, k; \forall j = 1, \dots, N; \forall (r_j, z) \in \Omega$ — задані функції на границі $\partial\Omega$ області, які можуть виступати в якості граничних управляючих впливів; $\lambda_i, \forall i = 1, \dots, k$ —

параметр, який характеризує енергетичні властивості елементів об'єкта (технологічного апарата); N — число поверхонь теплообміну (зокрема, ректифікаційних тарілок).

Змінні стану $\bar{\Phi}_i(r_j, z, t)$ та управління $\bar{U}_g(r_j, z, t)$ можуть визначати різні фізичні (зокрема, температуру, витрату), або геометричні (наприклад, рівень) величини, а також відхилення цих величин від стаціонарних значень; параметри λ_i визначають відповідно: коефіцієнт теплопровідності, коефіцієнт теплопередачі, тощо.

Таким чином, застосування ММ у вигляді (1) — (4) дасть змогу у подальшому втілити принцип типізації — тобто орієнтації на певний клас ММ — при розробці чисельного метода реалізації ММ часткових випадків процесів (апаратів) ППСВ.

Представимо (з метою конкретності подальших математичних викладок) узагальнену ММ (1) — (4) в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\Phi}_i(r_j, z, t)}{\partial t} = & \sum_{i=1}^3 A_i(\bar{\Phi}_i, r_j, z, t) \frac{\partial^2 \bar{\Phi}_i(r_j, z, t)}{\partial r_j^2} + \sum_{i=1}^3 B_i(\bar{\Phi}_i, r_j, z, t) \frac{\partial \bar{\Phi}_i(r_j, z, t)}{\partial r_j} + \\ & + \sum_{i=1}^3 B_i(\bar{\Phi}_i, r_j, z, t) \frac{\partial \bar{\Phi}_i(r_j, z, t)}{\partial z} + C_i(\bar{\Phi}_i, r_j, z, t) \bar{\Phi}_i(r_j, z, t) + \\ & + D_i(\bar{\Phi}_i, r_j, z, t) U_i(r_j, z, t) + E_i(\bar{\Phi}_i, r_j, z, t) F_i(r_j, z, t), \forall j = \overline{1, N}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \bar{g} = \{r_1, r_2, r_3, z\}, \bar{g} \in \Omega \subset R^3; \bar{\Phi}_i = [\Phi_{1_i}, \Phi_{2_i}, \dots, \Phi_{k_i}], t \in (0, t_k), Q = \Omega \times (0, t_k); \\ \bar{U}(r_j, z, t) = [U_1, U_2, \dots, U_{k_1}]^T, \bar{F}(r_j, z, t) = [F_1, F_2, \dots, F_k]^T, k_1 \leq k; \\ \Phi_i(0, \bar{g}) = \Phi_{0_i}(\bar{g}), \bar{g} \in \Omega; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\lambda_j(0, 0, t) \frac{\partial \Phi_i(0, 0, t)}{\partial r_j} + K_j(t) \Phi_i(0, 0, t) = \Psi_j(t), \forall j = \overline{1, N} \quad (7)$$

Перетворення початкової диференційної задачі (5) — (7) в різницеву може бути виконано за допомогою різноманітних різницевоїх схем [4, 5], що зумовлює також отримання цілої низки апроксимуючих дискретних ММ з різними якісними характеристиками. Аналіз вказаної літератури показує, що з точки зору структурної повноти розгляду можливих варіантів різницевоїх схем, для ДРЧП гіперболічного та гіперболо-параболічного типу доцільно використовувати шеститочковий шаблон [4]. Він дозволяє побудувати схеми двошарові за часом та тришарові за простором, тобто дає змогу розв'язувати задачі: стаціонарні та нестаціонарні, а також одно- (лінійні), дво- (пласкі) та тривимірні (об'ємні).

Введемо наступні сітки:

$$\begin{aligned} \bar{\omega}_{\Delta g} = \{\bar{g}_n = l \Delta \bar{g}, l = 0, 1, \dots, L\}; \omega_{\Delta t} = \{t_m = m \Delta t, m = 0, 1, \dots, M\}; \\ \bar{\omega}_{\Delta g \Delta t} = \bar{\omega}_{\Delta g} \times \omega_{\Delta t} = \{(l \Delta \bar{g}, m \Delta t), l = 0, 1, \dots, L, m = 0, 1, \dots, M\}, \end{aligned}$$

з кроками по просторових координатах $\Delta \bar{g} = \{\Delta r_j, \Delta z\}$; $\Delta r_j = r_{\max} / L_r$; $j = \overline{1, N}$; $\Delta z = z_{\max} / L_z$ (для рівномірних сіток $\Delta r = \Delta z$) та по часовій координаті $\Delta t = t_k / M$.

Позначимо через Φ_l^m значення сіткової функції у вузлі (\bar{g}_l, t_m) , визначеної на $\bar{\omega}_{\Delta\bar{g}\Delta t}$. Тоді, заміняючи безперервні похідні в рівняннях системи (5) на відповідні різницеві похідні, одержимо:

$$\begin{aligned} \Phi_{l_i}^{m+1} - \Phi_{l_i}^m &= \frac{A_i \{\cdot\}}{\Delta r_j^2} \left[\sigma \left(\Phi_{(l+1)_i}^{m+1} - 2\Phi_{l_i}^{m+1} + \Phi_{(l-1)_i}^{m+1} + (1-\sigma) \left(\Phi_{(l+1)_i}^m - 2\Phi_{l_i}^m + \Phi_{(l-1)_i}^m \right) \right) \right] + \\ &+ \frac{B_i \{\cdot\}}{(\Delta r_j + \Delta z)} \left[\Phi_{(l-1)_i}^{m+1} - 4\Phi_{l_i}^{m+1} + 3\Phi_{(l+1)_i}^{m+1} + \Phi_{l_{i+1}}^m - \Phi_{(l-1)_i}^m \right] + C_i \{\cdot\} \Phi_{l_i}^m + D_i \{\cdot\} U_{l_i}^m + E_i \{\cdot\} F_{l_i}^m \quad (8) \\ & j = \overline{1, N} \end{aligned}$$

де $i = 1, 2, \dots, k$; σ — довільний речовинний параметр ($0 \leq \sigma \leq 1$). Як різницевої аналог граничних умов (7) використаємо наступні вирази:

$$\lambda_j^m \frac{\Phi_{l_i}^m - \Phi_{l_{i-1}}^m}{\Delta r_j} - K_j^m \Phi_{n_i}^m = \Psi_j^m; r_j = 0, t \geq 0, i = 1, 2, \dots, k; j = \overline{1, N}. \quad (9)$$

Початкові умови мають вигляд:

$$\Phi_i(0, l) = \Phi_i^0(l). \quad (10)$$

Схема (8) описує однопараметричне (відносно σ) сімейство різницевої схем і, у відповідності до загально прийнятої термінології [5], носить назву схеми з вагами. Від вибору параметра σ залежить стійкість та точність схеми (8) [4, 5].

Розглянемо схеми, які відповідають частковим значенням σ . При $\sigma = 0$ та заміні часткових похідних першого порядку по простору на центральну різницю, тобто

$$\frac{\partial \Phi_i(r_j, z, t)}{\partial r_j} = \frac{\Phi_{(l+1)_i}^m - \Phi_{(l-1)_i}^m}{2\Delta r_j}, j = \overline{1, N};$$

$$\frac{\partial \Phi_i(r_j, z, t)}{\partial z} = \frac{\Phi_{(l+1)_i}^m - \Phi_{(l-1)_i}^m}{2\Delta z};$$

отримуємо чотириточкову схему (вироджений випадок для шеститочкового шаблону):

$$\begin{aligned} \frac{\Phi_{l_i}^{m+1} - \Phi_{l_i}^m}{\Delta t} &= A_i \{\cdot\} \frac{\Phi_{(l+1)_i}^m - 2\Phi_{l_i}^m + \Phi_{(l-1)_i}^m}{\Delta r_j^2} + B_i \{\cdot\} \frac{\Phi_{(l+1)_i}^m - \Phi_{(l-1)_i}^m}{(r_j + \Delta z)} + \\ &+ C_i \{\cdot\} \Phi_{l_i}^m + D_i \{\cdot\} U_{l_i}^m + E_i \{\cdot\} F_{l_i}^m, i = 1, 2, \dots, k; j = \overline{1, N}. \quad (11) \end{aligned}$$

Дана схема є явною. Значення сіткової функції Φ_l^{m+1} в кожній точці шару $t = (m+1)\Delta t$ (нового шару) виражається через відомі значення $\Phi_{(l+1)_i}^m, \Phi_{l_i}^m, \Phi_{(l-1)_i}^m$ на шарі $t = m\Delta t$ (старому шарі). Оскільки при $t = 0$ задана початкова умова (10), то схема (11) дозволяє послідовно визначити значення сіткової функції на будь-якому часовому шарі. Якщо $\sigma \neq 0$, то схема (8) буде містити як явні, так і неявні члени (так звана явно-неявна

схема). При $\sigma = 1$ та заміні часткової похідної першого порядку по простору наступним виразом

$$\frac{\partial \Phi_i(r_j, z, t)}{\partial r_j} = \frac{\Phi_{(l+1)_i}^{m+1} - \Phi_{(l-1)_i}^{m+1}}{2\Delta r_j}, j = \overline{1, N}; \quad \frac{\partial \Phi_i(r_j, z, t)}{\partial z} = \frac{\Phi_{(l+1)_i}^{m+1} - \Phi_{(l-1)_i}^{m+1}}{2\Delta z}$$

отримаємо чисто неявну схему:

$$\begin{aligned} \frac{\Phi_{l_i}^{m+1} - \Phi_{l_i}^m}{\Delta t} = & A_i \{ \} \frac{\Phi_{(l+1)_i}^{m+1} - 2\Phi_{l_i}^{m+1} + \Phi_{(l-1)_i}^{m+1}}{\Delta r_j^2} + B_i \{ \} \frac{\Phi_{(l+1)_i}^{m+1} - \Phi_{(l-1)_i}^{m+1}}{(\Delta r_j + \Delta z)} + \\ & + C_i \{ \} \Phi_{l_i}^m + D_i \{ \} U_{l_i}^m + E_i \{ \} F_{l_i}^m, i = 1, 2, \dots, k; j = \overline{1, N}. \end{aligned} \quad (12)$$

Рівняння (10) може бути використане у всій просторовій області $0 < r_j < r_{\max}; j = \overline{1, N}, 0 < z < z_{\max}$, за винятком граничних точок: $r_j = 0, r_j = z_{\max}$ та $z = 0, z = z_{\max}$. Для зазначених точок сіткова функція визначається із граничних умов (9).

Для випадку $\sigma = 0.5$ одержимо шеститочкову симетричну щодо явних членів схему:

$$\begin{aligned} \frac{\Phi_{l_i}^{m+1} - \Phi_{l_i}^m}{\Delta t} = & A_i \{ \} \left[\frac{\Phi_{(l+1)_i}^{m+1} - 2\Phi_{l_i}^{m+1} + \Phi_{(l-1)_i}^{m+1}}{2\Delta r_j^2} + \frac{\Phi_{(l+1)_i}^m - 2\Phi_{l_i}^m + \Phi_{(l-1)_i}^m}{2\Delta r_j^2} \right] + \\ & + \frac{B_i \{ \}}{2(\Delta r_j + \Delta z)} \left[\Phi_{(l-1)_i}^{m+1} - 4\Phi_{l_i}^{m+1} + 3\Phi_{(l+1)_i}^{m+1} + \Phi_{(l+1)_i}^m - \Phi_{(l-1)_i}^m \right] + \\ & + C_i \{ \} \Phi_{l_i}^m + D_i \{ \} U_{l_i}^m + E_i \{ \} F_{l_i}^m, i = 1, 2, \dots, k; j = \overline{1, N}. \end{aligned} \quad (13)$$

Схема (13) відома в літературі [4, 5] як схема Кранка-Ніколсона. Для неї справедливо зауваження, зроблене для схеми (12).

Таким чином схеми (11), (12) та (13) являють собою кінцевовимірні (дискретні) аналоги (дискретні ММ) узагальненої математичної моделі основних технологічних апаратів процесів ППСВ і вони суть складають основу програмно-алгоритмічних інструментальних засобів математичного моделювання зазначених процесів.

Спираючись на роботи [4, 5] легко показати, що явна схема (11) стійка лише за умови $\left[\Delta t / (\Delta r_j \Delta z) \right] \leq 1/2, j = \overline{1, N}$ яка зв'язує кроки $\Delta r_j, \Delta z; j = \overline{1, N}$ та Δt . При цьому схеми (12) і (13), для яких $\sigma \geq 0.5$, стійкі для будь-яких значень $\Delta r_j, \Delta z; j = \overline{1, N}$ та Δt . Крім того, виконавши розкладання в ряд Тейлора для задачі (8) одержимо, що при $\sigma = 0$ схема апроксимує вихідну задачу з точністю $e = 0[(\Delta t)] + 0[(\Delta z)^2]$, а при $\sigma \geq 0.5$ похибка відповідно складає $e = 0[(\Delta t)^2] + 0[(\Delta z)^2]$.

Різницеві схеми (11), (12) та (13) отримано з припущення про нелінійний та нестационарний характер матриць коефіцієнтів $A_i - E_i$ узагальненої ММ виду (1) — (4). Таке припущення досить суттєво і виникає з тієї обставини, що в технологічному циклі за досить нетривалий час (навіть у межах однієї зміни) у сирих вуглеводнів, які надходять на переробку, можуть значно змінюватися такі фізико-хімічні параметри як густина, газованість, температура, тощо. Це викликано тим, що сирі вуглеводні можуть подаватися на переробку, наприклад, безпосередньо із залізничних цистерн або зі

сховищ і, таким чином, перехід між сировиною з різними параметрами (наприклад, так звані «легкі» та «важкі» нафти), в свою чергу, може здійснюватися за короткий (в технологічному розумінні) час. Покажемо можливість врахування параметричної нелінійності різницевих схем (11), (12) та (13). Для конкретності подальших розмірковувань розглянемо схему (13).

Використовуючи матричну форму запису, представимо рівняння схеми (13) у наступному вигляді:

$$\begin{aligned} [\Phi_{l_i}^{m+1} - \Phi_{l_i}^m] &= \Delta t \left[\left(A_i + \frac{B_i}{2(\Delta r_j + \Delta z)} \right) \nabla^2 \Phi_{l_i} \right]^{m+1} + \\ &+ \Delta t \left[\left(A_i + \frac{B_i}{2(\Delta r_j + \Delta z)} + C_i \right) \nabla \Phi_{l_i} \right]^m = [D_i U^m + E_i F^m]. \end{aligned} \quad (14)$$

Виходячи з посилання про те, що відображення $G: \phi \rightarrow \phi$ (де ϕ — банановий простір, а відображення g задає перетворення за схемою (13)) — стисле, можна стверджувати, що для будь-яких $\Phi_{l_i}^1, \Phi_{l_i}^2 \in \phi$ виконується нерівність [6]

$$\|G(\Phi_{l_i}^1) - G(\Phi_{l_i}^2)\| \leq q \|\Phi_{l_i}^1 - \Phi_{l_i}^2\|; q \leq 1. \quad (15)$$

Далі скористаємося методом простої ітерації [4 — 6]. При цьому, якщо відображення $G: \phi \rightarrow \phi$ — стисле, то (14) має єдиний розв'язок $\Phi_{l_i}^*$:

$$\|\Phi_{l_i}^* - \Phi_{l_i}^v\| \leq \frac{q^v}{1-q} \|\Phi_{l_i}^1 - \Phi_{l_i}^0\|, \quad (16)$$

де v — номер ітерації.

Тоді можна стверджувати, що у досить малій околиці розв'язку $\Phi_{l_i}^*$ рівняння (14) для наближень методом простої ітерації має вигляд

$$\Phi_{l_i}^{v+1} - \Phi_{l_i}^v = T(\Phi_{l_i}^v) - G(\Phi_{l_i}^*). \quad (17)$$

Вважаючи, що характер нелінійності однаковий для всіх вузлів області дискретизації Ω , ітераційний процес (17) завершується за умови виконання критерію

$$\max_{L_r, L_z} \left| \frac{\Phi_{l_i}^{v+1} - \Phi_{l_i}^v}{\Phi_{l_i}^{v+1}} \right| \leq \delta_{l_i}, \quad (18)$$

де δ_{l_i} — задана точність розв'язку.

Відмінність запропонованого методу полягає в тому, що застосування при чисельній реалізації узагальненої ММ (вирази виду (1) — (4)) схеми Кранка — Ніколсона (вираз (13)) забезпечує на першому кроці розв'язання першу ітерацію ітераційного процесу (вираз (17)).

Конструктивність та ефективність запропонованого методу підтверджено розв'язанням прикладних задач з моделювання процесу електро-(термо)знесолення та зневоднення сирової нафти. Зокрема, моделювався динамічний стан термодегідраторів,

призначених для відокремлення сирової нафти від мінеральних солей та пластової води. Плоска нелінійна та нестационарна задача для дискретної області у 192 вузли (сітка розміром 16×12) і часу моделювання 6.5 год. (з кроком дискретизації $\Delta t = 90$ с) потребувала на розв'язання 218 с машинного часу (застосовувався процесор з тактовою частотою 1.5 ГГц). Збіжність ітераційного процесу (17) досяглась не більше, ніж за 7 ітерацій і не залежала від зміни вихідних даних, які визначали значення коефіцієнтів узагальної ММ виду (1) — (4).

Висновок

Таким чином, розроблено метод реалізації узагальної ММ процесів ППСВ, який зводиться до дискретизації неперервної узагальної ММ за схемою з вагами та подальшого розв'язання отриманої системи нелінійних дискретних рівнянь за процедурою простої ітерації.

Список літератури

1. Polozhaenko, S. Research of solvability of task of authentication of water-oil mixtures on the parameters of tuning of mathematical model / Polozhaenko S. A., Grigorenko Yu. V. // Інформатика та математичні методи в моделюванні. — 2012. — Т. 2. — №3. — С. 199 — 210.
2. Рей, У. Методы управления технологическими процессами. — М.: Мир, 1983. — 367 с.
3. Мацевитый, Ю. М. Моделирование нелинейных процессов в распределенных системах / Ю. М. Мацевитый, В. Е. Прокофьев. — К.: Наукова думка, 1985. — 302 с.
4. Самарский, А. А. Введение в теорию разностных схем. — М. Наука, 1971. — 552 с.
5. Самарский, А. А. Методы решения сеточных уравнений / А. А. Самарский, Е. С. Николаев. — М.: Наука, 1988. — 591 с.
6. Краскевич, В. Е. Численные методы в инженерных расчетах / В. Е. Краскевич, Л. Х. Зеленский, В. И. Гречко. — К.: Вища школа, 1986. — 263 с.

**ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РЕАЛИЗАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ
ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ СЫРЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ**

Ю. В. Григоренко

Одесский национальный политехнический университет,
просп. Шевченко, 1, Одесса, 65044, Украина; e-mail: ygrygorenko@lukoil.com

Выполнено обобщение математического описания процессов первичной переработки сырых углеводородов (ППСУ) в виде нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных, что дает возможность применить принцип типизации при последующем математическом моделировании указанных процессов. Предложен и обоснован эффективный численный метод реализации математических моделей (ММ) процессов ППСУ, основанный на итерационной процедуре решения нелинейных нестационарных дискретных ММ исследуемых процессов.

Ключевые слова: математическая модель, итерационный процесс, разностная схема, параметрическая нелинейность, сходимость итерационной процедуры, сжатость отображения

**NUMERICAL METHOD OF IMPLEMENTING MATHEMATICAL MODELS FOR THE PRIMARY
PROCESSING OF RAW HYDROCARBONS**

Yu. V. Grigorenko

Odessa National Polytechnic University,
1 Shevchenko Ave., Odessa, 65044, Ukraine; e-mail: ygrygorenko@lukoil.com

Generalization of the mathematical description of primary processing of raw hydrocarbons (PRH) in the form of nonstationary and nonlinear partial differential equations, which gives the opportunity to apply the principle of typification subsequent mathematical modeling of these processes. Proposed and justified efficient numerical method of realization of the mathematical model (MM) of processes of PRHs, based on the iterative procedure of solving nonlinear unsteady discrete MM investigated processes.

Keywords: mathematical model, iterative process, difference scheme, parametric non-linearity, the convergence of the iterative procedure, compactness display