

УДК 517.95

DOI: 10.32626/2308-5916.2020-21.83-101

**Ю. Є. Климяк**, канд. техн. наук,

**А. Я. Бомба**, д-р техн. наук, професор

Національний університет водного господарства

і природокористування, м. Рівне

### **КОМП'ЮТЕРНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ПРОЦЕСІВ «ФІЛЬТРУВАННЯ-РЕГЕНЕРАЦІЯ» ШВИДКИХ КОНУСОПОДІБНИХ АДСОРБЦІЙНИХ ФІЛЬТРІВ З КУСКОВО-ОДНОРІДНИМИ ПОРИСТИМИ ЗАВАНТАЖЕННЯМИ**

Для прогнозування процесів «фільтрування-регенерація» швидких конусоподібних адсорбційних фільтрів з кусково-однорідними пористими завантаженнями сформовано математичні моделі їх основних технологічних режимів: фільтрування, зворотньої промивки, хімічної регенерації та прямої промивки з урахуванням впливу температурних ефектів на внутрішню кінетику масопереносу при дотриманні сталих швидкостей відповідних режимів. Враховуючи, що у режимі фільтрування конвективні складові тепло- і масоперенесення та фізична і хімічна адсорбція переважають над вкладом дифузії й фізичної десорбції, у режимі хімічної регенерації конвективні складові тепло- і масоперенесення та фізична і хімічна десорбція переважають над вкладом дифузії й фізичної адсорбції, а у режимах зворотньої та прямої промивок конвективні складові тепло- і масоперенесення та фізична десорбція і хімічна адсорбція переважають над вкладом дифузії й фізичної адсорбції, отримано алгоритми числово-асимптотичних наближень розв'язків відповідних нелінійних сингулярно-збурених крайових задач для модельної конусоподібної області, обмеженої заданими, гладкими, ортогональними між собою по ребрах, двома еквіпотенціальними поверхнями і однією поверхнею течії та розділеної на декілька підобластей деякими заданими еквіпотенціальними поверхнями. Запропоновані моделі у комплексі за рахунок урахування впливу зміни температури та швидкості фільтраційного потоку вздовж висоти фільтру на коефіцієнти, які характеризують швидкості масообміну при фізичній і хімічній адсорбції та десорбції, коефіцієнт фільтрації, дають змогу шляхом проведення комп'ютерних експериментів більш якісно дослідити зміну концентрацій домішок у фільтраційному потоці і на поверхні адсорбенту завантаження, утримуваних за рахунок фізичної і хімічної адсорбції, температури фільтраційного потоку, коефіцієнта фільтрації та активної пористості у кожному шарі завантаження вздовж висоти фільтру та на їх основі спрогнозувати більш оптимальні варіанти ви-

користання адсорбентів кожного шару завантаження і часові інтервали роботи фільтрів відповідно у режимах фільтрування, зворотньої промивки, хімічної регенерації та прямої промивки при дотриманні сталих швидкостей відповідних режимів.

**Ключові слова:** *математична модель, прогнозування, фільтрування, промивка, хімічна регенерація, домішка, адсорбція, десорбція, температура, швидкий конусоподібний фільтр, кусково-однорідне пористе завантаження.*

**Вступ.** Для водопідготовки (очищення) великих обсягів води дедалі ширше використовуються швидкі адсорбційні фільтри з одно- і багат шаровими пористими регенеративними завантаженнями при дотриманні сталої швидкості фільтрування 5-10 м/год. За допомогою регенерації (з використанням спеціальних хімічних речовин) адсорбційні властивості фільтрувальних матеріалів завантажень вдається майже повністю відновити, причому, як правило, в автоматичному режимі, з мінімальною участю користувача [1-5]. Як адсорбенти у них використовують природні (бентоніт, монтморилоніт, торф), штучні (активоване вугілля, штучні цеоліти, полісорби) та синтетичні матеріали (наноструктуровані вуглецеві сорбенти) [6-8].

Важливою особливістю процесу фільтрування є збільшення гідравлічного опору завантаження фільтра через накопичення частинок домішок на поверхні адсорбенту завантаження за рахунок фізичної і хімічної адсорбції, тому підтримка постійної швидкості фільтрування досягається автоматичним регулюванням збільшення відкриття засувки на трубопроводі фільтрату в міру збільшення опору. Імпульсом для збільшення відкриття засувки на трубопроводі фільтрату служить зміна рівня води на фільтрі (контролюється поплавковим пристроєм) або витрати води в трубопроводі фільтрату (контролюється за допомогою дроселюючого пристрою і дифманометра) [9]. Коли засувка відкрита повністю, фільтр вимикається з роботи для регенерації завантаження. Десорбція домішок з поверхні адсорбенту завантаження є необхідною стадією технологічного процесу регенерації швидких фільтрів. Спочатку включається режим зворотньої промивки з високою швидкістю подачі води (в 2-3 рази вища за швидкість режиму фільтрування), який триває 5-20 хв. і дозволяє розпушити фільтруючий матеріал кожного шару завантаження та видалити частинки домішок з поверхні адсорбенту завантаження, накопичені там за рахунок фізичної адсорбції. Далі здійснюється режим хімічної регенерації з високою швидкістю подачі розчину певного реагенту (зазвичай використовується перманганат калію  $\text{KMnO}_4$ ), що запускає процес хімічного відновлення адсорбційної здатності фільтрувального матеріалу кожного шару завантаження і триває 10-30 хв. У розчин реагенту переходять частинки домішки з

поверхні адсорбенту завантаження, накопичені там за рахунок хімічної адсорбції. Останнім здійснюється режим прямої промивки з високою швидкістю подачі води, що триває до 10 хв. і дозволяє ущільнити фільтруючий матеріал кожного шару завантаження та видалити залишки домішок і хімічного розчину реагенту.

Постійно зростаючі потреби у господарстві в очищеній воді та зростання вартості фільтрувальних матеріалів вимагають проведення досліджень з одного боку їх більш оптимального використання і збільшення тривалості роботи швидких адсорбційних фільтрів у режимі фільтрування за рахунок вибору їх форми, висоти шарів, зокрема, з урахуванням впливу температурних ефектів на внутрішню кінетику масопереносу, а з іншого — регенерації пористих завантажень для їх повторного використання.

**Аналіз останніх досліджень.** Фільтрування води через пористі завантаження швидких адсорбційних фільтрів є окремим випадком руху рідин через пористі матеріали і закономірності цього руху досить повно висвітлені в працях Д. М. Мінца, Л. С. Лейбензона, Н. Н. Павловського, С. А. Шуберта та інших дослідників [10-12]. Установлено, що при фільтруванні води через пористі матеріали справедливим є лінійний закон Дарсі, тобто має місце ламінарний режим руху води. Швидкість процесу адсорбції залежить від концентрації, природи і структури домішок, швидкості фільтрування, температури фільтраційного потоку, виду і властивостей адсорбенту [13]. В якості математичних моделей для прогнозування процесів «фільтрування-регенерація» пористих завантажень вітчизняними дослідниками найчастіше використовується модель Д. М. Мінца [10, 12] при дотриманні сталих швидкостей відповідних процесів та температури або деяка її модифікація (вдосконалена модель). У [14] запропоновано її просторове узагальнення для прогнозування процесу адсорбційної доочистки води від домішок у швидких фільтрах конусоподібної форми при додержанні сталої швидкості фільтрування, яка є більш ефективною для проведення теоретичних досліджень, націлених на оптимізацію параметрів процесу фільтрування (тривалості роботи, форми, розмірів фільтра, висоти шарів тощо) за рахунок введення додаткових рівнянь для визначення зміни коефіцієнта фільтрації та активної пористості завантаження вздовж висоти фільтру, врахування дифузії у фільтраційному потоці і на поверхні адсорбенту завантаження. Актуальною задачею є узагальнення відповідної моделі для прогнозування технологічних режимів фільтрування, зворотної промивки, хімічної регенерації та прямої промивки швидких конусоподібних адсорбційних фільтрів з кусково-однорідними пористими завантаженнями з урахуванням впливу температурних ефектів

на внутрішню кінетику масопереносу. Ці моделі у комплексі за рахунок урахування впливу зміни температури та швидкості фільтраційного потоку вздовж висоти фільтру на коефіцієнти, які характеризують швидкості масообміну при фізичній і хімічній адсорбції та десорбції, коефіцієнт фільтрації, дадуть змогу шляхом проведення комп'ютерних експериментів спрогнозувати більш оптимальні варіанти використання адсорбентів кожного шару завантаження і часові інтервали роботи фільтрів відповідно у режимах фільтрування, зворотньої промивки, хімічної регенерації та прямої промивки при дотриманні сталих швидкостей відповідних режимів.

**Постановка математичних моделей.** Сформуємо модельні задачі прогнозування процесів «фільтрування-регенерація» швидкого конусоподібного адсорбційного фільтру з кусково-однорідними пористими завантаженнями для області  $G = G_z \times (0, \infty)$ ,  $G_z$  — просторова однозв'язна область ( $z = (x, y, z)$ ), обмежена заданими гладкими, ортогональними між собою по ребрах, двома еквіпотенціальними поверхнями  $S_*$ ,  $S^*$  і однією поверхнею течії  $S^{**}$  та розділена на  $p$  підобластей  $G_z^r$  ( $r = \overline{1, p}$ ) деякими заданими  $p - 1$  еквіпотенціальними поверхнями  $S_{*r}^*$  ( $r = \overline{1, p - 1}$ ) (рис. 1).

Вважаючи, що у режимі фільтрування конвективні складові тепло- і масоперенесення та фізична і хімічна адсорбція переважають над вкладом дифузії й фізичної десорбції, у режимі хімічної регенерації конвективні складові тепло- і масоперенесення та фізична і хімічна десорбція переважають над вкладом дифузії й фізичної адсорбції, а у режимах зворотньої та прямої промивок конвективні складові тепло- і масоперенесення та фізична десорбція і хімічна адсорбція переважають над вкладом дифузії й фізичної адсорбції, просторові модельні задачі для прогнозування технологічних режимів швидкого конусоподібного адсорбційного фільтру при дотриманні сталих швидкостей відповідних режимів з урахуванням зворотного впливу характеристик процесу (концентрацій домішок відповідно у фільтраційному потоці і на поверхні адсорбенту завантаження, температури фільтраційного потоку) на характеристики завантаження (коефіцієнти фільтрації, активної пористості, коефіцієнти, які характеризують швидкості масообміну при фізичній і хімічній адсорбції та десорбції домішок) складатимуться з рівнянь руху фільтраційного потоку згідно із законом Дарсі та рівняння нерозривності:

$$\{\vec{v} = \kappa_0^0 \cdot \text{grad } \varphi, \text{div } \vec{v} = 0, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}, \quad (1)$$

рівнянь для визначення зміни концентрацій домішок у фільтраційному потоці і на поверхні адсорбенту завантаження, утримуваних за

рахунок фізичної та хімічної адсорбції, температури фільтраційного потоку, коефіцієнта фільтрації та активної пористості вздовж висоти фільтру відповідно для режимів фільтрування:

$$\left\{ \begin{array}{l} (\sigma \cdot C)'_t = \operatorname{div} (D_1 \cdot \operatorname{grad} C) - \vec{v} \cdot \operatorname{grad} C - \alpha \cdot C + \beta \cdot U - \alpha^* \cdot C, \\ (\sigma \cdot U)'_t = \operatorname{div} (D_2 \cdot \operatorname{grad} U) + \alpha \cdot C - \beta \cdot U, \\ (\sigma \cdot W)'_t = \operatorname{div} (D_3 \cdot \operatorname{grad} W) + \alpha^* \cdot C, \\ (\sigma \cdot T)'_t = \operatorname{div} (D^* \cdot \operatorname{grad} T) - \vec{v} \cdot \operatorname{grad} T + \gamma \cdot (\alpha \cdot C - \beta \cdot U) + \gamma^* \cdot \alpha^* \cdot C, \\ \kappa'_t = -\mu \cdot U - \mu^* \cdot W, \\ \sigma'_t = -\lambda \cdot U - \lambda^* \cdot W, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}, \end{array} \right. \quad (2)$$

хімічної регенерації:

$$\left\{ \begin{array}{l} (\sigma \cdot C)'_t = \operatorname{div} (D_1 \cdot \operatorname{grad} C) - \vec{v} \cdot \operatorname{grad} C + \beta \cdot U - \alpha \cdot C + \beta^* \cdot W, \\ (\sigma \cdot U)'_t = \operatorname{div} (D_2 \cdot \operatorname{grad} U) - \beta \cdot U + \alpha \cdot C, \\ (\sigma \cdot W)'_t = \operatorname{div} (D_3 \cdot \operatorname{grad} W) - \beta^* \cdot W, \\ (\sigma \cdot T)'_t = \operatorname{div} (D^* \cdot \operatorname{grad} T) - \vec{v} \cdot \operatorname{grad} T + \gamma \cdot (\beta \cdot U - \alpha \cdot C) + \gamma^* \cdot \beta^* \cdot W, \\ \kappa'_t = \mu \cdot U + \mu^* \cdot W, \\ \sigma'_t = \lambda \cdot U + \lambda^* \cdot W, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}, \end{array} \right. \quad (3)$$

зворотньої та прямої промивок:

$$\left\{ \begin{array}{l} (\sigma \cdot C)'_t = \operatorname{div} (D_1 \cdot \operatorname{grad} C) - \vec{v} \cdot \operatorname{grad} C + \beta \cdot U - \alpha \cdot C - \alpha^* \cdot C, \\ (\sigma \cdot U)'_t = \operatorname{div} (D_2 \cdot \operatorname{grad} U) - \beta \cdot U + \alpha \cdot C, \\ (\sigma \cdot W)'_t = \operatorname{div} (D_3 \cdot \operatorname{grad} W) + \alpha^* \cdot C, \\ (\sigma \cdot T)'_t = \operatorname{div} (D^* \cdot \operatorname{grad} T) - \vec{v} \cdot \operatorname{grad} T + \gamma \cdot (\beta \cdot U - \alpha \cdot C) + \gamma^* \cdot \alpha^* \cdot C, \\ \kappa'_t = \mu \cdot U - \mu^* \cdot W, \\ \sigma'_t = \lambda \cdot U - \lambda^* \cdot W, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}, \end{array} \right. \quad (4)$$

які доповнюються наступними крайовими умовами:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi|_{S_*} = \varphi_*, \varphi|_{S^*} = \varphi^*, \varphi'_n|_{S^{**}} = 0, \end{array} \right. \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C|_{S_*} = c_*, C'_n|_{S^*} = 0, C''_n|_{S^{**}} = 0, \\ U|_{S_*} = u_*, U'_n|_{S^*} = 0, U''_n|_{S^{**}} = 0, \\ W|_{S_*} = u_*, W'_n|_{S^*} = 0, W''_n|_{S^{**}} = 0, \\ T|_{S_*} = T_*, T'_n|_{S^*} = 0, T''_n|_{S^{**}} = 0, \end{array} \right. \quad (6)$$

початковими умовами:

$$\begin{cases} C|_{t=0} = c_0^0, U|_{t=0} = u_0^0, W|_{t=0} = w_0^0, \\ T|_{t=0} = T_0^0, \kappa|_{t=0} = \kappa_0^0, \sigma|_{t=0} = \sigma_0^0 \end{cases} \quad (7)$$

та умовами узгодженості на поверхнях розділу  $S_{*r}^*$  ( $r = \overline{1, p-1}$ ):

$$\begin{cases} \varphi|_{S_{r-}^*} = \varphi|_{S_{r+}^*} = \varphi_{*r}^*, \kappa_r^0 \cdot \varphi_{\vec{n}}'|_{S_{r-}^*} = \kappa_r^0 \cdot \varphi_{\vec{n}}'|_{S_{r+}^*}, \quad r = \overline{1, p-1}, \\ \left\{ \begin{array}{l} C|_{S_{r-}^*} = C|_{S_{r+}^*}, U|_{S_{r-}^*} = U|_{S_{r+}^*}, W|_{S_{r-}^*} = W|_{S_{r+}^*}, T|_{S_{r-}^*} = T|_{S_{r+}^*}, \\ D_{1,r} \cdot C_{\vec{n}}' - v_{rn}^0 \cdot C|_{S_{r-}^*} = D_{1,r+1} \cdot C_{\vec{n}}' - v_{rn}^0 \cdot C|_{S_{r+}^*}, \\ D_{2,r} \cdot U_{\vec{n}}'|_{S_{r-}^*} = D_{2,r+1} \cdot U_{\vec{n}}'|_{S_{r+}^*}, \\ D_{3,r} \cdot W_{\vec{n}}'|_{S_{r-}^*} = D_{3,r+1} \cdot W_{\vec{n}}'|_{S_{r+}^*}, \\ D_r^* \cdot T_{\vec{n}}' - v_{rn}^0 \cdot T|_{S_{r-}^*} = D_{r+1}^* \cdot T_{\vec{n}}' - v_{rn}^0 \cdot T|_{S_{r+}^*}, \\ D_{1,r} \cdot C_{\vec{n}}' - v_{rn} \cdot C + D_{2,r} \cdot U' + D_{3,r} \cdot W_{\vec{n}}'|_{S_{r-}^*} = \\ = D_{1,r+1} \cdot C_{\vec{n}}' - v_{rn} \cdot C + D_{2,r+1} \cdot U' + D_{3,r+1} \cdot W_{\vec{n}}'|_{S_{r+}^*}, \\ (\sigma \cdot (C + U + W))_t'|_{S_{r-}^*} = (\sigma \cdot (C + U + W))_t'|_{S_{r+}^*}, \quad r = \overline{1, p-1}, \end{array} \right. \end{cases} \quad (9)$$

де  $\varphi = \varphi(x, y, z)$  і  $\vec{v} = \vec{v}(v_x, v_y, v_z)$  — відповідно потенціал і вектор швидкості фільтрації,  $0 \leq \varphi_* = \varphi_{*0}^* < \varphi_{*1}^* < \dots < \varphi_{*p-1}^* < \varphi_{*p}^* = \varphi^* < \infty$ ,  $\varphi_*$  і  $\varphi^*$  — задані дійсні числа,  $\varphi_{*1}^*, \varphi_{*2}^*, \dots, \varphi_{*(p-1)}^*$  — невідомі значення потенціалу,  $v = |\vec{v}| = \sqrt{v_x^2(x, y, z) + v_y^2(x, y, z) + v_z^2(x, y, z)} \gg 0$ ,  $\kappa_*^*$  — початковий коефіцієнт фільтрації,  $\kappa_*^* = \{\kappa_r^*, (x, y, z) \in G_r^r, r = \overline{1, p}\}$ ,  $\kappa_r^* > 0$  ( $r = \overline{1, p}$ ),  $\vec{n}$  — зовнішня нормаль до відповідної поверхні,  $C = C(x, y, z, t)$  — концентрація домішок у фільтраційному потоці,  $U = U(x, y, z, t)$  і  $W = W(x, y, z, t)$  — концентрації домішок на поверхні адсорбенту завантаження, утримуваних відповідно за рахунок фізичної та хімічної адсорбції,  $T = T(x, y, z, t)$  — температура фільтраційного потоку,  $\kappa = \kappa(x, y, z, t)$  — коефіцієнт фільтрації,  $\sigma = \sigma(x, y, z, t)$  — активна пористість в точці  $(x, y, z)$  у момент часу  $t$ ,  $D_1$  — коефіцієнт дифузії домішок у фільтраційному потоці,  $D_2$  і

$D_3$  — коефіцієнти дифузії домішок на поверхні адсорбенту завантаження, утримуваних відповідно за рахунок фізичної та хімічної адсорбції,  $D_s = \{D_{s,r}, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}$ ,  $D_{s,r} = \varepsilon \cdot d_{s,r,0}$ ,  $d_{s,r,0} > 0$  ( $s = \overline{1, 3}$ ,  $r = \overline{1, p}$ ),  $D^*$  — коефіцієнт температуропровідності,  $D^* = \{D_r^*, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}$ ,  $D_r^* = \varepsilon \cdot d_{r,0}^*$ ,  $d_{r,0}^* > 0$  ( $r = \overline{1, p}$ ),  $\alpha$  і  $\beta$  — коефіцієнти, які характеризують швидкість масообміну відповідно при фізичній адсорбції та десорбції домішок, для модельної задачі прогнозування режиму фільтрування

$$\alpha = \{\alpha_r, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}, \alpha_r = \sum_{s_1=0}^2 \sum_{s_2=0}^{2-s_1} \varepsilon^{s_1+s_2} \cdot \alpha_{r,s_1,s_2} \cdot \nu^{s_1} \cdot T^{s_2},$$

$$\alpha_{r,s_1,s_2} \in \mathbb{R} \quad (r = \overline{1, p}, s_1, s_2 = \overline{0, 2}), \beta = \{\beta_r, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\},$$

$$\beta_r = \varepsilon \cdot \sum_{s_1=0}^2 \sum_{s_2=0}^{2-s_1} \varepsilon^{s_1+s_2} \cdot \beta_{r,s_1,s_2} \cdot \nu^{s_1} \cdot T^{s_2}, \beta_{r,s_1,s_2} \in \mathbb{R} \quad (r = \overline{1, p}, s_1, s_2 = \overline{0, 2}),$$

а модельних задач прогнозування режимів хімічної регенерації, зворотньої та прямої промивок

$$\alpha = \{\alpha_r, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}, \alpha_r = \varepsilon \cdot \sum_{s_1=0}^2 \sum_{s_2=0}^{2-s_1} \varepsilon^{s_1+s_2} \cdot \alpha_{r,s_1,s_2} \cdot \nu^{s_1} \cdot T^{s_2},$$

$$\alpha_{r,s_1,s_2} \in \mathbb{R} \quad (r = \overline{1, p}, s_1, s_2 = \overline{0, 2}), \beta = \{\beta_r, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\},$$

$$\beta_r = \sum_{s_1=0}^2 \sum_{s_2=0}^{2-s_1} \varepsilon^{s_1+s_2} \cdot \beta_{r,s_1,s_2} \cdot \nu^{s_1} \cdot T^{s_2}, \beta_{r,s_1,s_2} \in \mathbb{R} \quad (r = \overline{1, p}, s_1, s_2 = \overline{0, 2}),$$

$\alpha^*$  — коефіцієнт, який характеризує швидкість масообміну при хімічній адсорбції домішок, для модельних задач прогнозування режимів фільтрування, зворотньої та прямої промивок  $\alpha^* = \{\alpha_r^*, (x, y, z) \in G_z^r,$

$$r = \overline{1, p}\}, \alpha_r^* = \sum_{s_1=0}^2 \sum_{s_2=0}^{2-s_1} \varepsilon^{s_1+s_2} \cdot \alpha_{r,s_1,s_2}^* \cdot \nu^{s_1} \cdot T^{s_2}, \alpha_{r,s_1,s_2}^* \in \mathbb{R} \quad (r = \overline{1, p}, s_1,$$

$s_2 = \overline{0, 2}), \beta^*$  — коефіцієнт, який характеризує швидкість масообміну при хімічній десорбції домішок, для модельної задачі прогнозування режиму хімічної регенерації,  $\beta^* = \{\beta_r^*, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\},$

$$\beta_r^* = \sum_{s_1=0}^2 \sum_{s_2=0}^{2-s_1} \varepsilon^{s_1+s_2} \cdot \beta_{r,s_1,s_2}^* \cdot \nu^{s_1} \cdot T^{s_2}, \beta_{r,s_1,s_2}^* \in \mathbb{R} \quad (r = \overline{1, p}, s_1, s_2 = \overline{0, 2}),$$

$\gamma$  — коефіцієнт, що характеризує швидкість зміни температури фі-

льтраційного потоку при фізичній адсорбції та десорбції домішок,  $\gamma = \{\gamma_r, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}$ ,  $\gamma_r \in \mathbb{R}$  ( $r = \overline{1, p}$ ),  $\gamma^*$  — коефіцієнт, що характеризує швидкість зміни температури фільтраційного потоку при хімічній адсорбції та десорбції домішок,  $\gamma^* = \{\gamma_r^*, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}$ ,  $\gamma_r^* \in \mathbb{R}$  ( $r = \overline{1, p}$ ),  $\mu$  і  $\lambda$  — коефіцієнти, що характеризують швидкість зміни відповідно коефіцієнта фільтрації й активної пористості завантаження при фізичній адсорбції та десорбції домішок,  $\mu = \{\mu_r, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}$ ,  $\mu_r = \varepsilon \cdot \sum_{s=0}^2 \varepsilon^s \cdot \mu_{r,s} \cdot T^s$ ,  $\mu_{r,s} \in \mathbb{R}$  ( $r = \overline{1, p}$ ,  $s = \overline{0, 2}$ ),  $\lambda = \{\lambda_r, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}$ ,  $\lambda_r = \varepsilon \cdot \bar{\lambda}_r$  ( $r = \overline{1, p}$ ),  $\mu^*$  і  $\lambda^*$  — коефіцієнти, що характеризують швидкість зміни відповідно коефіцієнта фільтрації й активної пористості завантаження при хімічній адсорбції і десорбції домішок,

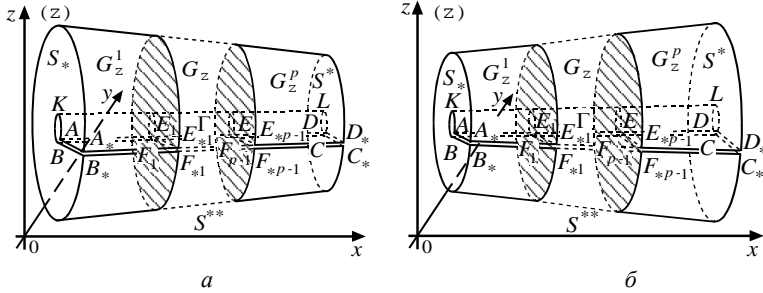
$$\begin{aligned} \mu^* &= \{\mu_r^*, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}, \mu_r^* = \varepsilon \cdot \sum_{s=0}^2 \varepsilon^s \cdot \mu_{r,s}^* \cdot T^s, \mu_{r,s}^* \in \mathbb{R} \\ (r = \overline{1, p}, s = \overline{0, 2}), \lambda^* &= \{\lambda_r^*, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}, \lambda_r^* = \varepsilon \cdot \bar{\lambda}_r^* \\ (r = \overline{1, p}), \alpha_r &= \alpha_r(x, y, z, t), \beta_r = \beta_r(x, y, z, t), \alpha_r^* = \alpha_r^*(x, y, z, t), \\ \beta_r^* &= \beta_r^*(x, y, z, t), \mu_r = \mu_r(x, y, z, t), \bar{\lambda}_r = \bar{\lambda}_r(x, y, z, t), \\ \mu_r^* &= \mu_r^*(x, y, z, t), \bar{\lambda}_r^* = \bar{\lambda}_r^*(x, y, z, t) \end{aligned}$$

— неперервні обмежені функції ( $r = \overline{1, p}$ ),  $\varepsilon$  — малий параметр ( $\varepsilon > 0$ ),

$$\begin{aligned} c_0^0 &= \{c_r^0, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}, u_0^0 = \{u_r^0, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}, \\ w_0^0 &= \{w_r^0, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}, T_0^0 = \{T_r^0, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}, \\ \kappa_0^0 &= \{\kappa_r^0, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}, \sigma_0^0 = \{\sigma_r^0, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}, \\ c_*^* &= c_*^*(M, t), c_r^0 = c_r^0(x, y, z), u_*^* = u_*^*(M, t), u_r^0 = u_r^0(x, y, z), \\ w_*^* &= w_*^*(M, t), w_r^0 = w_r^0(x, y, z), T_*^* = T_*^*(M, t), T_r^0 = T_r^0(x, y, z), \\ \kappa_r^0 &= \kappa_r^0(x, y, z), \sigma_r^0 = \sigma_r^0(x, y, z) \quad (r = \overline{1, p}) \end{aligned}$$

— достатньо гладкі функції, узгоджені між собою на ребрах області  $G$  [15],  $M \in S_*$ ,  $v_{rn}^0$  і  $v_{rn}$  ( $r = \overline{1, p-1}$ ) — відповідно початкові і поточні нормальні складові швидкості на поверхнях розділу  $S_{*r}^*$  ( $r = \overline{1, p-1}$ ).





**Рис. 1.** Просторові області фільтрації  $G_z$  з умовним розрізом  $\Gamma$  для модельних задач прогнозування технологічних режимів: а — фільтрування та прямої промивки; б — зворотної промивки та хімічної регенерації

Аналогічно [14, 15] шляхом виконання умовного розрізу  $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2$ , де  $\Gamma_1 = AKLDBKLC$  і  $\Gamma_2 = ADD_*A_*BCC_*B_*$  розрізи вздовж відповідних поверхонь течії, модельні задачі для прогнозування режимів фільтрування (1), (2) (5)-(9), хімічної регенерації (1), (3), (5)-(9), зворотної та прямої промивок (1), (4)-(9) швидких конусоподібних фільтрів з кусково-однорідними пористими завантаженнями зводяться до розв'язання в однозв'язній кусково-однорідній області  $G_z \setminus \Gamma$  — криволінійному паралелепіпеді  $ABCD_*B_*C_*D_*$ , обмеженому гладкими, ортогональними між собою в кутових точках та вздовж ребер, двома еквіпотенціальними поверхнями  $ABB_*A_*$ ,  $CDD_*C_*$  і чотирма поверхнями течії  $ABCD = AKLD \cup BKLC$ ,  $A_*B_*C_*D_*$ ,  $ADD_*A_* = BCC_*B_*$  та розділеному на  $p$  підобластей  $G_z^1 \setminus \Gamma^1 = ABF_1E_1A_*B_*F_{*1}E_{*1}$ , ...,  $G_z^p \setminus \Gamma^p = E_{p-1}F_{p-1}CDE_{*(p-1)}F_{*(p-1)}C_*D_*$  ( $\Gamma^1 = AE_1E_{*1}A_*BF_1F_{*1}B_*$ , ...,  $\Gamma^p = E_{p-1}DD_*E_{*(p-1)}F_{p-1}CC_*F_{*(p-1)}$ ) еквіпотенціальними поверхнями  $E_rF_rF_{*r}E_{*r}$  ( $r = 1, p-1$ ) (рис. 2), з додаванням умови непроникності  $\varphi'_n|_{\Gamma} = 0$  вздовж умовного розрізу  $\Gamma$  задач, що описуються системою рівнянь (1) та відповідно системами рівнянь (2), (3) і (4) з крайовими умовами:

$$\left\{ \begin{aligned} \varphi \Big|_{ABB_*A_*} = \varphi_*, \varphi \Big|_{CDD_*C_*} = \varphi^*, \varphi'_n \Big|_{ABCD \cup A_*B_*C_*D_* \cup ADD_*A_* \cup BCC_*B_*} = 0, \\ \left\{ \begin{aligned} C \Big|_{ABB_*A_*} = C_*^*, C'_n \Big|_{CDD_*C_*} = 0, C'_n \Big|_{ADD_*A_* \cup BCC_*B_* \cup ABCD \cup A_*B_*C_*D_*} = 0, \\ U \Big|_{ABB_*A_*} = u_*^*, U'_n \Big|_{CDD_*C_*} = 0, U'_n \Big|_{ADD_*A_* \cup BCC_*B_* \cup ABCD \cup A_*B_*C_*D_*} = 0, \\ W \Big|_{ABB_*A_*} = w_*^*, W'_n \Big|_{CDD_*C_*} = 0, W'_n \Big|_{ADD_*A_* \cup BCC_*B_* \cup ABCD \cup A_*B_*C_*D_*} = 0, \\ T \Big|_{ABB_*A_*} = T_*^*, T'_n \Big|_{CDD_*C_*} = 0, T'_n \Big|_{ADD_*A_* \cup BCC_*B_* \cup ABCD \cup A_*B_*C_*D_*} = 0, \end{aligned} \right. \end{aligned} \right. \quad (10)$$

початковими умовами (7), умовами узгодженості на еквіпотенціальних поверхнях розділу  $E_r F_r F_{*r} E_{*r}$  ( $r = 1, p-1$ ):

$$\begin{cases} \varphi \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r}} = \varphi \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r}} = \varphi_{*r}^*, \\ \kappa_r^0 \cdot \varphi'_n \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r}} = \kappa_{r+1}^0 \cdot \varphi'_n \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r}}, \quad r = 1, p-1, \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} C \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r}} = C \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r}}, U \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r}} = U \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r}}, \\ W \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r}} = W \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r}}, T \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r}} = T \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r}}, \\ D_{1,r} \cdot C'_n - v_{rn}^0 \cdot C \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r}} = D_{1,r+1} \cdot C'_n - v_{rn}^0 \cdot C \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r}}, \\ D_{2,r} \cdot U'_n \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r}} = D_{2,r+1} \cdot U'_n \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r}}, \\ D_{3,r} \cdot W'_n \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r}} = D_{3,r+1} \cdot W'_n \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r}}, \\ D_r^* \cdot T'_n - v_{rn}^0 \cdot T \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r}} = D_{r+1}^* \cdot T'_n - v_{rn}^0 \cdot T \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r}}, \\ D_{1,r} \cdot C'_n - v_{rn} \cdot C + D_{2,r} \cdot U'_n + D_{3,r} \cdot W'_n \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r}} = \\ = D_{1,r+1} \cdot C'_n - v_{rn} \cdot C + D_{2,r+1} \cdot U'_n + D_{3,r+1} \cdot W'_n \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r}}, \\ (\sigma \cdot (C + U + W))'_t \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r}} = (\sigma \cdot (C + U + W))'_t \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r}}, \\ r = 1, p-1 \end{cases} \quad (13)$$

і подальшого «склеювання» берегів умовного розрізу  $\Gamma$  із використанням умов:

$$\begin{cases} \varphi \Big|_{AKLD} = \varphi \Big|_{BKLC}, \varphi \Big|_{ADD,A} = \varphi \Big|_{BCC,B}, \\ \varphi'_n \Big|_{AKLD} = \varphi'_n \Big|_{BKLC}, \varphi'_n \Big|_{ADD,A} = \varphi'_n \Big|_{BCC,B}, \end{cases} \quad (14)$$

та узгодженості величин концентрацій домішок у фільтраційному потоці і на поверхні адсорбенту завантаження, утримуваних за рахунок фізичної і хімічної адсорбції, значень температури фільтраційного потоку на умовних поверхнях розрізу  $\Gamma$  із використанням умов:

$$\begin{cases} C \Big|_{AKLD} = C \Big|_{BKLC}, C \Big|_{ADD,A} = C \Big|_{BCC,B}, \\ U \Big|_{AKLD} = U \Big|_{BKLC}, U \Big|_{ADD,A} = U \Big|_{BCC,B}, \\ W \Big|_{AKLD} = W \Big|_{BKLC}, W \Big|_{ADD,A} = W \Big|_{BCC,B}, \\ T \Big|_{AKLD} = T \Big|_{BKLC}, T \Big|_{ADD,A} = T \Big|_{BCC,B}, \\ C'_n \Big|_{AKLD} = C'_n \Big|_{BKLC}, C'_n \Big|_{ADD,A} = C'_n \Big|_{BCC,B}, \\ U'_n \Big|_{AKLD} = U'_n \Big|_{BKLC}, U'_n \Big|_{ADD,A} = U'_n \Big|_{BCC,B}, \\ W'_n \Big|_{AKLD} = W'_n \Big|_{BKLC}, W'_n \Big|_{ADD,A} = W'_n \Big|_{BCC,B}, \\ T'_n \Big|_{AKLD} = T'_n \Big|_{BKLC}, T'_n \Big|_{ADD,A} = T'_n \Big|_{BCC,B}. \end{cases} \quad (15)$$

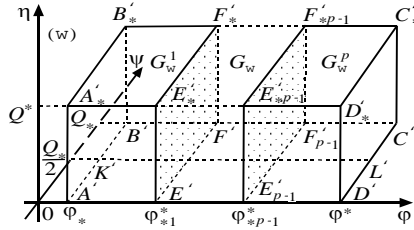


Рис. 2. Просторова область комплексного потенціалу  $G_w$

Аналогічно до [14, 15] фільтраційна задача (1), (10), (12), (14) замінюється більш загальною прямою задачею на знаходження просторового аналогу кусково-конформного відображення однов'язної області  $G_z \setminus \Gamma$  на відповідну область комплексного потенціалу — прямокутний паралелепіпед  $G_w = A'B'C'D'A_*B_*C_*D_*$ , який розділений деякими поверхнями  $E'_r F'_r E''_r F''_r$  ( $r = \overline{1, p}$ ) на  $p$  підобластей  $G_w^1 = A'B'E'_1 F'_1 A''_1 B''_1 E''_1 F''_1$ ,  $G_w^r = E'_r F'_r F''_{r+1} E''_{r+1} E''_r F''_r F''_{r+1} E''_{r+1}$  ( $r = \overline{2, p-2}$ ),  $G_w^p = E'_{p-1} F'_{p-1} C'D'E''_{p-1} F''_{p-1} C''_p D''_p$  (рис. 2), де  $G_w^r = \{w = (\varphi, \psi, \eta) : \varphi_{*(r-1)}^* < \varphi < \varphi_r^*, 0 < \psi < Q_*, 0 < \eta < Q_*^*\}$  ( $r = \overline{1, p}$ ),  $\varphi_r^*$  ( $r = \overline{1, p-1}$ ),  $Q_*$ ,  $Q^*$  — невідомі параметри,  $Q = Q_* \cdot Q^*$  — повна фільтраційна витрата, і наступного «склеювання» берегів умовного розрізу  $\Gamma$ . Алгоритм розв'язання цієї задачі отримано в [16], зокрема, знайдено поле швидкостей  $\vec{v}$ , параметри  $Q_*$ ,  $Q^*$ ,  $Q$  та ряд інших величин. Здійснивши заміну змінних  $x = x(\varphi, \psi, \eta)$ ,  $y = y(\varphi, \psi, \eta)$ ,  $z = z(\varphi, \psi, \eta)$  у рівняннях (2), (3) і (4) та умовах (11), (7), (13), (15) отримаємо просторові модельні задачі для прогнозування технологічних режимів роботи швидких конусоподібних адсорбційних фільтрів з кусково-однорідними пористими навантаженими для області  $G_w \times (0, \infty)$  відповідно для режимів фільтрування:

$$\left\{ \begin{aligned} (\tilde{\sigma} \cdot c)'_t &= D_1 \cdot (b_1 \cdot c''_{\varphi\varphi} + b_2 \cdot c''_{\psi\psi} + b_3 \cdot c''_{\eta\eta} + b_4 \cdot c'_\psi + b_5 \cdot c'_\eta) - \\ &- \tilde{v}^2 / \kappa_*^* \cdot c'_\varphi - \tilde{\alpha} \cdot c - \tilde{\beta} \cdot u + \tilde{\alpha}^* \cdot c, \\ (\tilde{\sigma} \cdot u)'_t &= D_2 \cdot (b_1 \cdot u''_{\varphi\varphi} + b_2 \cdot u''_{\psi\psi} + b_3 \cdot u''_{\eta\eta} + b_4 \cdot u'_\psi + b_5 \cdot u'_\eta) + \tilde{\alpha} \cdot c - \tilde{\beta} \cdot u, \\ (\tilde{\sigma} \cdot w)'_t &= D_3 \cdot (b_1 \cdot w''_{\varphi\varphi} + b_2 \cdot w''_{\psi\psi} + b_3 \cdot w''_{\eta\eta} + b_4 \cdot w'_\psi + b_5 \cdot w'_\eta) + \tilde{\alpha}^* \cdot c, \\ (\tilde{\sigma} \cdot \tilde{T})'_t &= D^* \cdot (b_1 \cdot \tilde{T}''_{\varphi\varphi} + b_2 \cdot \tilde{T}''_{\psi\psi} + b_3 \cdot \tilde{T}''_{\eta\eta} + b_4 \cdot \tilde{T}'_\psi + b_5 \cdot \tilde{T}'_\eta) - \\ &- \tilde{v}^2 / \kappa_*^* \cdot \tilde{T}'_\varphi + \tilde{\gamma} \cdot (\tilde{\alpha} \cdot c - \tilde{\beta} \cdot u) + \tilde{\gamma}^* \cdot \tilde{\alpha}^* \cdot c, \\ \tilde{\kappa}'_t &= -\tilde{\mu} \cdot u + \tilde{\mu}^* \cdot w, \\ \tilde{\sigma}'_t &= -\tilde{\lambda} \cdot u - \tilde{\lambda}^* \cdot w, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^r, r = \overline{1, p}, \end{aligned} \right. \quad (16)$$

хімічної регенерації:

$$\begin{cases}
 (\tilde{\sigma} \cdot c)'_t = D_1 \cdot (b_1 \cdot c''_{\varphi\varphi} + b_2 \cdot c''_{\psi\psi} + b_3 \cdot c''_{\eta\eta} + b_4 \cdot c'_{\psi} + b_5 \cdot c'_{\eta}) - \\
 - \tilde{v}^2 / \kappa_*^* \cdot c'_{\varphi} + \tilde{\beta} \cdot u - \tilde{\alpha} \cdot c + \tilde{\beta}^* \cdot w, \\
 (\tilde{\sigma} \cdot u)'_t = D_2 \cdot (b_1 \cdot u''_{\varphi\varphi} + b_2 \cdot u''_{\psi\psi} + b_3 \cdot u''_{\eta\eta} + b_4 \cdot u'_{\psi} + b_5 \cdot u'_{\eta}) - \tilde{\beta} \cdot u + \tilde{\alpha} \cdot c, \\
 (\tilde{\sigma} \cdot w)'_t = D_3 \cdot (b_1 \cdot w''_{\varphi\varphi} + b_2 \cdot w''_{\psi\psi} + b_3 \cdot w''_{\eta\eta} + b_4 \cdot w'_{\psi} + b_5 \cdot w'_{\eta}) - \tilde{\beta}^* \cdot w, \\
 (\tilde{\sigma} \cdot \tilde{T})'_t = D^* \cdot (b_1 \cdot \tilde{T}''_{\varphi\varphi} + b_2 \cdot \tilde{T}''_{\psi\psi} + b_3 \cdot \tilde{T}''_{\eta\eta} + b_4 \cdot \tilde{T}'_{\psi} + b_5 \cdot \tilde{T}'_{\eta}) - \\
 - \tilde{v}^2 / \kappa_*^* \cdot \tilde{T}'_{\varphi} + \tilde{\gamma} \cdot (\tilde{\beta} \cdot u - \tilde{\alpha} \cdot c) + \tilde{\gamma}^* \cdot \tilde{\beta}^* \cdot w, \\
 \tilde{\kappa}'_t = \tilde{\mu} \cdot u + \tilde{\mu}^* \cdot w, \\
 \tilde{\sigma}'_t = \tilde{\lambda} \cdot u + \tilde{\lambda}^* \cdot w, (\varphi, \psi, \eta) \in G_{\omega}^r, r = \overline{1, p},
 \end{cases} \quad (17)$$

зворотньої та прямої промивок:

$$\begin{cases}
 (\tilde{\sigma} \cdot c)'_t = D_1 \cdot (b_1 \cdot c''_{\varphi\varphi} + b_2 \cdot c''_{\psi\psi} + b_3 \cdot c''_{\eta\eta} + b_4 \cdot c'_{\psi} + b_5 \cdot c'_{\eta}) - \\
 - \tilde{v}^2 / \kappa_*^* \cdot c'_{\varphi} + \tilde{\beta} \cdot u - \tilde{\alpha} \cdot c - \alpha^* \cdot c, \\
 (\tilde{\sigma} \cdot u)'_t = D_2 \cdot (b_1 \cdot u''_{\varphi\varphi} + b_2 \cdot u''_{\psi\psi} + b_3 \cdot u''_{\eta\eta} + b_4 \cdot u'_{\psi} + b_5 \cdot u'_{\eta}) - \tilde{\beta} \cdot u + \tilde{\alpha} \cdot c, \\
 (\tilde{\sigma} \cdot w)'_t = D_3 \cdot (b_1 \cdot w''_{\varphi\varphi} + b_2 \cdot w''_{\psi\psi} + b_3 \cdot w''_{\eta\eta} + b_4 \cdot w'_{\psi} + b_5 \cdot w'_{\eta}) + \alpha^* \cdot c, \\
 (\tilde{\sigma} \cdot \tilde{T})'_t = D^* \cdot (b_1 \cdot \tilde{T}''_{\varphi\varphi} + b_2 \cdot \tilde{T}''_{\psi\psi} + b_3 \cdot \tilde{T}''_{\eta\eta} + b_4 \cdot \tilde{T}'_{\psi} + b_5 \cdot \tilde{T}'_{\eta}) - \\
 - \tilde{v}^2 / \kappa_*^* \cdot \tilde{T}'_{\varphi} + \tilde{\gamma} \cdot (\tilde{\beta} \cdot u - \tilde{\alpha} \cdot c) + \tilde{\gamma}^* \cdot \alpha^* \cdot c, \\
 \tilde{\kappa}'_t = \tilde{\mu} \cdot u - \tilde{\mu}^* \cdot w, \\
 \tilde{\sigma}'_t = \tilde{\lambda} \cdot u - \tilde{\lambda}^* \cdot w, (\varphi, \psi, \eta) \in G_{\omega}^r, r = \overline{1, p}
 \end{cases} \quad (18)$$

з крайовими умовами:

$$\begin{cases}
 c \Big|_{\varphi=\varphi_*} = \tilde{c}_*^*, c'_{\varphi} \Big|_{\varphi=\varphi_*} = 0, \\
 c_{\psi} \Big|_{\psi=0} = c'_{\psi} \Big|_{\psi=Q_*} = c'_{\eta} \Big|_{\eta=0} = c'_{\eta} \Big|_{\eta=Q_*} = 0, \\
 u \Big|_{\varphi=\varphi_*} = \tilde{u}_*^*, u'_{\varphi} \Big|_{\varphi=\varphi_*} = 0, \\
 u'_{\psi} \Big|_{\psi=0} = u'_{\psi} \Big|_{\psi=Q_*} = u'_{\eta} \Big|_{\eta=0} = u'_{\eta} \Big|_{\eta=Q_*} = 0, \\
 w \Big|_{\varphi=\varphi_*} = \tilde{w}_*^*, w'_{\varphi} \Big|_{\varphi=\varphi_*} = 0, \\
 w'_{\psi} \Big|_{\psi=0} = w'_{\psi} \Big|_{\psi=Q_*} = w'_{\eta} \Big|_{\eta=0} = w'_{\eta} \Big|_{\eta=Q_*} = 0, \\
 \tilde{T} \Big|_{\varphi=\varphi_*} = \tilde{T}_*^*, \tilde{T}'_{\varphi} \Big|_{\varphi=\varphi_*} = 0, \\
 \tilde{T}'_{\psi} \Big|_{\psi=0} = \tilde{T}'_{\psi} \Big|_{\psi=Q_*} = \tilde{T}'_{\eta} \Big|_{\eta=0} = \tilde{T}'_{\eta} \Big|_{\eta=Q_*} = 0,
 \end{cases} \quad (19)$$

початковими умовами:

$$\begin{cases} c|_{t=0} = \tilde{c}_0^0, u|_{t=0} = \tilde{u}_0^0, w|_{t=0} = \tilde{w}_0^0, \\ \tilde{T}|_{t=0} = \tilde{T}_0^0, \tilde{\kappa}|_{t=0} = \tilde{\kappa}_0^0, \tilde{\sigma}|_{t=0} = \tilde{\sigma}_0^0, \end{cases} \quad (20)$$

умовами узгодженості на поверхнях розділу  $E'_r F'_r E'_r F'_r$  ( $r = \overline{1, p-1}$ ) та на умовних поверхнях розрізу:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{r-0}^+} c = \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{r+0}^+} c, \quad \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{r-0}^+} u = \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{r+0}^+} u, \\ \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{r-0}^+} w = \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{r+0}^+} w, \quad \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{r-0}^+} \tilde{T} = \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{r+0}^+} \tilde{T}, \\ \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{r-0}^+} (D_{1,r} \cdot c'_\varphi - \kappa_r^* \cdot c) = \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{r+0}^+} (D_{1,r+1} \cdot c'_\varphi - \kappa_{r+1}^* \cdot c), \\ \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{r-0}^+} D_{2,r} \cdot u'_\varphi = \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{r+0}^+} D_{2,r+1} \cdot u'_\varphi, \\ \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{r-0}^+} D_{3,r} \cdot w'_\varphi = \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{r+0}^+} D_{3,r+1} \cdot w'_\varphi, \\ \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{r-0}^+} (D_r^* \cdot \tilde{T}'_\varphi - \kappa_r^* \cdot \tilde{T}) = \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{r+0}^+} (D_{r+1}^* \cdot \tilde{T}'_\varphi - \kappa_{r+1}^* \cdot \tilde{T}), \\ \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{r-0}^+} (D_{1,r} \cdot c'_\varphi - \tilde{\kappa} \cdot c + D_{2,r} \cdot u'_\varphi + D_{3,r} \cdot w'_\varphi) = \\ = \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{r+0}^+} (D_{1,r+1} \cdot c'_\varphi - \tilde{\kappa} \cdot c + D_{2,r+1} \cdot u'_\varphi + D_{3,r+1} \cdot w'_\varphi), \\ \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{r-0}^+} (\tilde{\sigma} \cdot (c + u + w))'_t = \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{r+0}^+} (\tilde{\sigma} \cdot (c + u + w))'_t, \quad r = \overline{1, p-1}, \end{array} \right. \quad (21)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} c|_{\eta=0, \psi=\tilde{\psi}} = c|_{\eta=0, \psi=Q, -\tilde{\psi}}, \quad c|_{\psi=0} = c|_{\psi=Q}, \\ u|_{\eta=0, \psi=\tilde{\psi}} = u|_{\eta=0, \psi=Q, -\tilde{\psi}}, \quad u|_{\psi=0} = u|_{\psi=Q}, \\ w|_{\eta=0, \psi=\tilde{\psi}} = w|_{\eta=0, \psi=Q, -\tilde{\psi}}, \quad w|_{\psi=0} = w|_{\psi=Q}, \\ \tilde{T}|_{\eta=0, \psi=\tilde{\psi}} = \tilde{T}|_{\eta=0, \psi=Q, -\tilde{\psi}}, \quad \tilde{T}|_{\psi=0} = \tilde{T}|_{\psi=Q}, \\ c'_n|_{\eta=0, \psi=\tilde{\psi}} = c'_n|_{\eta=0, \psi=Q, -\tilde{\psi}}, \quad c'_n|_{\psi=0} = c'_n|_{\psi=Q}, \\ u'_n|_{\eta=0, \psi=\tilde{\psi}} = u'_n|_{\eta=0, \psi=Q, -\tilde{\psi}}, \quad u'_n|_{\psi=0} = u'_n|_{\psi=Q}, \\ w'_n|_{\eta=0, \psi=\tilde{\psi}} = w'_n|_{\eta=0, \psi=Q, -\tilde{\psi}}, \quad w'_n|_{\psi=0} = w'_n|_{\psi=Q}, \\ \tilde{T}'_n|_{\eta=0, \psi=\tilde{\psi}} = \tilde{T}'_n|_{\eta=0, \psi=Q, -\tilde{\psi}}, \quad \tilde{T}'_n|_{\psi=0} = \tilde{T}'_n|_{\psi=Q}, \end{array} \right. \quad (22)$$

де

$$\begin{aligned} c &= c(\varphi, \psi, \eta, t) = \overline{C(x(\varphi, \psi, \eta), y(\varphi, \psi, \eta), z(\varphi, \psi, \eta), t)}, \dots, \\ \tilde{v}_r &= \tilde{v}_r(\varphi, \psi, \eta) \quad (r = \overline{1, p}), \quad b_{r,s} = b_{r,s}(\varphi, \psi, \eta) \quad (r = \overline{1, p}, s = \overline{1, 5}), \\ b_{r,1} &= \varphi_x'^2 + \varphi_y'^2 + \varphi_z'^2 = \tilde{v}_r^2 / (\kappa_r^0)^2, \quad b_{r,2} = \psi_x'^2 + \psi_y'^2 + \psi_z'^2, \end{aligned}$$

$$b_{r,3} = \eta_x'' + \eta_y'' + \eta_z'', \quad b_{r,4} = \psi_{xx}'' + \psi_{zz}'', \quad b_{r,5} = \eta_{xx}'' + \eta_{yy}'' + \eta_{zz}'', \quad \widehat{\psi} \in [0, Q_*/2].$$

Алгоритмізація розв'язання. Аналогічно до [14, 15] для області  $G_w \times (0, \infty)$  знайдено числово-асимптотичні наближення

$$c = \{c_r, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^r, r = \overline{1, p}\}, \quad u = \{u_r, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^r, r = \overline{1, p}\}, \\ w = \{w_r, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^r, r = \overline{1, p}\}, \quad \tilde{T} = \{\tilde{T}_r, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^r, r = \overline{1, p}\}, \\ \tilde{\kappa} = \{\tilde{\kappa}_r, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^r, r = \overline{1, p}\}, \quad \tilde{\sigma} = \{\tilde{\sigma}_r, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^r, r = \overline{1, p}\}$$

розв'язків модельних задач прогнозування відповідно режимів фільтрування (16), (19)-(22), хімічної регенерації (17), (19)-(22), зворотньої та прямої промивок (18)-(22) з точністю  $O(\varepsilon^{n+1})$  у вигляді таких рядів:

$$c_r = \sum_{i=0}^n \varepsilon^i \cdot c_{r,i} + P_{1,r}, \quad u_r = \sum_{i=0}^n \varepsilon^i \cdot u_{r,i} + P_{2,r}, \quad w_r = \sum_{i=0}^n \varepsilon^i \cdot w_{r,i} + P_{3,r}, \\ \tilde{T}_r = \sum_{i=0}^n \varepsilon^i \cdot \tilde{T}_{r,i} + P_{4,r}, \quad \tilde{\kappa}_r = \sum_{i=0}^n \varepsilon^i \cdot \tilde{\kappa}_{r,i} + P_{5,r}, \quad \tilde{\sigma}_r = \sum_{i=0}^n \varepsilon^i \cdot \tilde{\sigma}_{r,i} + P_{6,r},$$

$$\text{де } P_{s,r} = \sum_{i=0}^{n+1} \varepsilon^i \cdot (\tilde{P}_{s,r,i} + \check{P}_{s,r,i}) + \sum_{i=0}^{2n+1} \varepsilon^{i/2} \cdot (\hat{P}_{s,r,i} + \widehat{P}_{s,r,i} + \check{P}_{s,r,i} + \tilde{P}_{s,r,i}) + R_{s,r,n+1}$$

$$(s = \overline{1, 6}), \quad c_{r,i} = c_{r,i}(\varphi, \psi, \eta, t), \quad u_{r,i} = u_{r,i}(\varphi, \psi, \eta, t), \quad w_{r,i} = w_{r,i}(\varphi, \psi, \eta, t),$$

$$\tilde{T}_{r,i} = \tilde{T}_{r,i}(\varphi, \psi, \eta, t), \quad \tilde{\kappa}_{r,i} = \tilde{\kappa}_{r,i}(\varphi, \psi, \eta, t), \quad \tilde{\sigma}_{r,i} = \tilde{\sigma}_{r,i}(\varphi, \psi, \eta, t) \quad (r = \overline{1, p},$$

$$i = \overline{0, n}) \text{ — члени регулярних частин асимптотик, } \tilde{P}_{s,r,i} = \tilde{P}_{s,r,i}(\tilde{\varphi}_{r-1}, \psi, \eta, t),$$

$$\check{P}_{s,r,i} = \check{P}_{s,r,i}(\check{\varphi}_r, \psi, \eta, t) \quad (s = \overline{1, 6}, \quad r = \overline{1, p}, \quad i = \overline{0, n+1}) \text{ — функції типу}$$

примежового шару відповідно в околах  $\varphi = \varphi_{*r}^*$  ( $r = \overline{0, p}$ ) (поправки на вході, виході і в околі поверхонь розділу шарів фільтру),

$$\hat{P}_{s,r,i} = \hat{P}_{s,r,i}(\varphi, \tilde{\psi}, \eta, t), \quad \widehat{P}_{s,r,i} = \widehat{P}_{s,r,i}(\varphi, \tilde{\psi}, \eta, t), \quad \check{P}_{s,r,i} = \check{P}_{s,r,i}(\varphi, \psi, \tilde{\eta}, t),$$

$$\tilde{P}_{s,r,i} = \tilde{P}_{s,r,i}(\varphi, \psi, \tilde{\eta}, t) \quad (s = \overline{1, 6}, \quad r = \overline{1, p}, \quad i = \overline{0, 2n+1}) \text{ — функції типу}$$

примежового шару відповідно в околах  $\psi = 0$ ,  $\psi = Q_*$ ,  $\eta = 0$ ,  $\eta = Q^*$

(поправки на бічній стінці фільтру і берегах умовного розрізу  $\Gamma$ ),

$$\tilde{\varphi}_r = (\varphi - \varphi_{*r}^*)/\varepsilon \quad (r = \overline{0, p-1}), \quad \check{\varphi}_r = (\varphi_{*r}^* - \varphi)/\varepsilon \quad (r = \overline{1, p}), \quad \tilde{\psi} = \psi/\sqrt{\varepsilon},$$

$$\check{\psi} = (Q_* - \psi)/\sqrt{\varepsilon}, \quad \tilde{\eta} = \eta/\sqrt{\varepsilon}, \quad \check{\eta} = Q^* - \eta/\sqrt{\varepsilon} \text{ — відповідні їм регуляри-$$

ризуючі перетворення (розтяги),  $R_{s,r,n+1}(\varphi, \psi, \eta, t, \varepsilon) \quad (s = \overline{1, 6},$

$r = \overline{1, p})$  — залишкові члени.

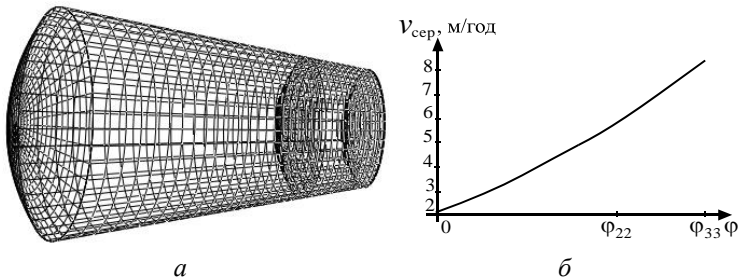
**Результати числових розрахунків.** У ході комп'ютерного експерименту для прогнозування процесів «фільтрування-регенерація» шви-

дкого конусоподібного адсорбційного фільтру довжиною 1 м з двома однорідними шарами пористого завантаження проведено дослідження його основних технологічних режимів фільтрування, зворотної промивки, хімічної регенерації та прямої промивки. Форму модельного фільтру та поверхню розділу  $EFF_*E_*$  описано поверхнями:

$$f_*(x, y, z) = x^2 + y^2 + z^2 - 4, \quad f^*(x, y, z) = x^2 + y^2 + z^2 - 1, \quad f^{**}(x, y, z) = 7,54863 \cdot x^2 - y^2 - z^2, \quad f_*^*(x, y, z) = x^2 + y^2 + z^2 - 2,25.$$

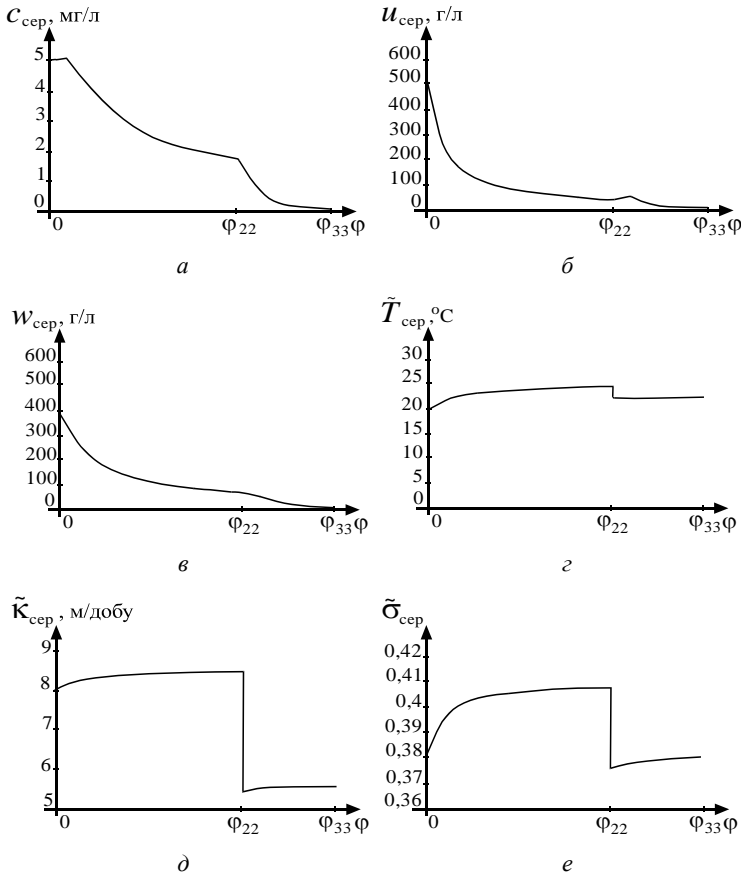
Функції  $f_*(x, y, z)$ ,  $f^*(x, y, z)$  та  $f^{**}(x, y, z)$  підібрані так, щоб у режимі фільтрування забезпечити «монотонне звузнення» в напрямку від його входу до виходу та взаємну ортогональність граней уздовж ребер. При цьому кожен шар фільтру характеризується різними початковими значеннями коефіцієнтів фільтрації  $\kappa_1^* = 8,5$  м/добу,  $\kappa_2^* = 5,6$  м/добу, активної пористості  $\tilde{\sigma}_1^* = 0,41$ ,  $\tilde{\sigma}_2^* = 0,38$ , дифузії домішок  $D_{1,1} = 0,0003$  м<sup>2</sup>/добу,  $D_{1,2} = 0,0002$  м<sup>2</sup>/добу,  $D_{2,1} = 0,000005$  м<sup>2</sup>/добу,  $D_{2,2} = 0,000002$  м<sup>2</sup>/добу,  $D_{3,1} = 0,0000007$  м<sup>2</sup>/добу,  $D_{3,2} = 0,0000003$  м<sup>2</sup>/добу і температуропровідності фільтраційного потоку  $D_1^* = 0,0005$  м<sup>2</sup>/добу,  $D_2^* = 0,0003$  м<sup>2</sup>/добу.

У результаті побудовано розрахункову сіткову область  $G_z$  (рис. 3 а) при  $n = n_1 + n_2 = 33$ ,  $n_1 = 22$ ,  $n_2 = 11$ ,  $m = 17$ ,  $l = 9$ ,  $\varphi_* = \varphi_0 = 0$ ,  $\varphi^* = \varphi_{33} = 14,5$ . Значення  $\varphi^*$  вибиралося так, щоб середня швидкість фільтрації  $v_{\text{сер}}$  вздовж модельного фільтра становила 5 м/год. Для області  $G_z$  знайдено фільтраційну витрату  $Q = 84,1$  м<sup>3</sup>/год і значення потенціалу на поверхні розділу  $\varphi_*^* = \varphi_{22} = 8,2$  та обчислено величини швидкостей фільтрації (рис. 3 б) і функції  $b_i(\varphi, \psi, \eta)$  ( $i = 1, 5$ ).



**Рис. 3.** Результати побудови фільтраційного поля конусоподібного фільтру для модельної задачі прогнозування технологічного режиму фільтрування:

а — розрахована сіткова область;  
б — розподіл середніх величин швидкості фільтрації вздовж висоти фільтру



**Рис. 4.** Розподіл середніх величин концентрацій домішок відповідно у фільтраційній течії (а), адсорбованих на поверхні адсорбенту завантаження при фізичній (б) та хімічній (в) адсорбції, температури фільтраційного потоку (г), коефіцієнта фільтрації (д) і активної пористості (е) вздовж висоти фільтру у момент часу  $t_3 = 15$  год для модельної задачі прогнозування режиму фільтрування

На рис. 4 представлено розподіли середніх величин  $c_{\text{сep}}(\varphi, t)$ ,  $u_{\text{сep}}(\varphi, t)$ ,  $w_{\text{сep}}(\varphi, t)$ ,  $\tilde{T}_{\text{сep}}(\varphi, t)$ ,  $\tilde{K}_{\text{сep}}(\varphi, t)$  і  $\tilde{\sigma}_{\text{сep}}(\varphi, t)$  вздовж висоти завантаження фільтру у момент часу  $t_3 = 15$  год для модельної задачі прогнозування режиму фільтрування при  $c_{\text{кр}} = 0,00005$  г/л,  $c_* = 0,005$  г/л,  $c_0^0 = 0$ ,  $u_0^0 = 0$ ,  $w_0^0 = 0$ ,  $\tilde{T}_0^0 = 20$  °С,  $\kappa_0^0 = \kappa_*$ ,  $\sigma_0^0 = \sigma_*$ ,



$$\begin{aligned} \tilde{\alpha}_1 &= 0,3 - 0,01 \cdot \tilde{v} - 0,008 \cdot \tilde{T} \text{ c}^{-1}, & \tilde{\alpha}_2 &= 0,38 - 0,01 \cdot \tilde{v} - 0,011 \cdot \tilde{T} \text{ c}^{-1}, & \tilde{\beta}_s &= \\ &= 0,00001 \cdot \tilde{\alpha}_s \text{ c}^{-1} \quad (s = 1, 2), & \tilde{\alpha}_1^* &= 0,25 - 0,002 \cdot \tilde{v} - 0,01 \cdot \tilde{T} \text{ c}^{-1}, & \tilde{\alpha}_2^* &= 0,35 - \\ & - 0,001 \cdot \tilde{v} - 0,011 \cdot \tilde{T} \text{ c}^{-1}, & \tilde{\gamma}_1 &= 1200 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{л/г}, & \tilde{\gamma}_2 &= 1500 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{л/г}, & \tilde{\gamma}_1^* &= \\ &= 60000 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{л/г}, & \tilde{\gamma}_2^* &= 80000 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{л/г} & \tilde{\mu}_1 &= 0,000025 \text{ л/(г} \cdot \text{с)}, & \tilde{\mu}_2 &= \\ &= 0,000023 \text{ л/(г} \cdot \text{с)}, & \tilde{\mu}_1^* &= 0,000025 \text{ л/(г} \cdot \text{с)}, & \tilde{\mu}_2^* &= 0,000023 \text{ л/(г} \cdot \text{с)}, & \tilde{\lambda}_1 &= \\ &= 0,000031 \text{ л/(г} \cdot \text{с)}, & \tilde{\lambda}_2 &= 0,000028 \text{ л/(г} \cdot \text{с)}, & \tilde{\lambda}_1^* &= 0,000021 \text{ л/(г} \cdot \text{с)}, & \tilde{\lambda}_2^* &= \\ &= 0,00002 \text{ л/(г} \cdot \text{с)}. \end{aligned}$$

**Висновки.** Запропоновані моделі для прогнозування процесів «фільтрування-регенерація» швидких конусоподібних адсорбційних фільтрів з кусково-однорідними пористими завантаженнями у комплексі за рахунок урахування впливу температурних ефектів на внутрішню кінетику масопереносу аналогічно [17, 18] дають змогу шляхом проведення комп'ютерних експериментів більш якісно дослідити зміну концентрацій домішок у фільтраційному потоці і на поверхні адсорбенту завантаження, утримуваних за рахунок фізичної і хімічної адсорбції, температури фільтраційного потоку, коефіцієнта фільтрації та активної пористості у кожному шарі завантаження вздовж висоти фільтру та на їх основі спрогнозувати більш оптимальні варіанти використання адсорбентів кожного шару завантаження і часові інтервали роботи фільтрів відповідно у режимах фільтрування, зворотньої промивки, хімічної регенерації та прямої промивки при дотриманні сталих швидкостей відповідних режимів. У перспективі планується розповсюдження даної методики на нанофільтри [19].

### Список використаних джерел:

1. Двадненко М. В., Привалова Н. М., Кудасева І. Ю., Степура А. Г. Адсорбційна очистка сточних вод. *Современные наукоемкие технологии*. 2010. № 10. С. 214-215.
2. Корнева Д. А., Куров Л. Н. Адсорбційна очистка — ефективний метод очистки сточних вод і підготовки води для господарсько-питвєвого водопользования. *Успехи современного естествознания*. 2011. № 7. С. 129.
3. Edzwald J. Water Quality & Treatment. A Handbook on Drinking Water. McGraw-Hill Professional, 2010. 1996 p.
4. Hendricks D. W. Fundamentals of water treatment unit processes: physical, chemical, and biological. Boca Raton: CRC Press, 2011. 883 p.
5. Орлов В. О., Мартинов С. Ю., Зошук А. М. Проектування станцій прояснення та знебарвлення води. Рівне: НУВГП, 2007. 252 с.
6. Sabadash V., Mylanyk O., Matsuska O., Gumnytsky J. Kinetic regularities of copper ions adsorption by natural zeolite. *Chemistry and chemical technology*. 2017. Vol. 11, № 4. P. 459-462.
7. Мальований М. С., Сакалова Г. В., Василінич Т. М., Братушак А. О. Дослідження здатності глинистих сорбентів до адсорбції іонів важких мета-

- лів. *Сталий розвиток XXI століття: управління, технології, моделі — Дискусії 2016* : колективна монографія / за наук. ред. проф. Є. В. Хлобистова. Черкаси: Видавець Чабаненко Ю., 2016. 590 с.
8. Сакалова Г. В., Василеніч Т. М. Дослідження ефективності очищення стічних вод від іонів важких металів з використанням природних адсорбентів : монографія. Вінниця: ТОВ «Твори», 2019. 92 с.
  9. Невзорова А. Б. Основы автоматизации систем водоснабжения и водоотведения : пособие. Гомель: УО «БелГУТ», 2005. 115 с.
  10. Бомба А. Я., Сафоник А. П. Моделювання нелінійно-збурених процесів очищення рідин від багатокomпонентних забруднень : монографія. Рівне: НУВГП, 2017. 296 с.
  11. Душкин С. С. Физические методы водоподготовки : учеб. пособие. Киев: УМК ВО, 1989. 151 с.
  12. Минц Д. М. Теоретические основы технологии очистки воды. М.: Стройиздат, 1964. 156 с.
  13. Макаревич Н. А., Богданович Н. И. Теоретические основы адсорбции : учебное пособие. Архангельск: САФУ, 2015. 362 с.
  14. Климяк Ю. Є., Бомба А. Я. Комп'ютерне прогнозування адсорбційної доочистки води від домішок у швидких багат шарових фільтрах конусо-подібної форми. *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки* : зб. наук. праць. Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2019. Вип. 20. С. 51-68. DOI: 10.32626/2308-5916.2019-20.51-68.
  15. Бомба А. Я., Климяк Ю. Є. Математичне моделювання просторових сингулярно-збурених процесів типу фільтрація-конвекція-дифузія : монографія. Рівне: ТзОВ фірма «Ассоль», 2014. 273 с.
  16. Klimjuk Ju. Je. Modelling of spatial filtration fields for one class of rapid multilayer filters of cone-shaped form with piecewise-homogeneous porous loads. *Proceedings of III International scientific conference «Science: new goals»*. London: SI Universum, 2017. P. 4-10.
  17. Бомба А. Я., Климяк Ю. Є. Прогнозування зміни характеристик кусково-однорідних пористих завантажень швидких багат шарових фільтрів. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: *Математичне моделювання в техніці та технологіях*. Харків: НТУ «ХП», 2018. № 27 (1303). С. 8-15.
  18. Бомба А. Я., Климяк Ю. Є. Прогнозування оптимального використання фільтруючих матеріалів у швидких багат шарових фільтрах із кусково-однорідними пористими завантаженнями. *Журнал обчислювальної та прикладної математики* : наук. журн. Київ. нац. ун-т ім. Тараса Шевченка. Київ: ТВіМС, 2017. Вип. 1 (124). С. 3-14.
  19. Petryk M. R., Khimichb A., Petryk M. M., Fraissard J. Experimental and computer simulation studies of dehydration on microporous adsorbent of natural gas used as motor fuel. *Fuel*. 2019. Vol. 239. P. 1324-1330.

## **COMPUTER PREDICTION OF «FILTRATION-REGENERATION» PROCESSES OF RAPID CONE-SHAPED ADSORPTION FILTERS WITH PIECEWISE-HOMOGENEOUS POROUS LOADS**

To predict the processes of «filtration-regeneration» of fast cone-shaped adsorption filters with piecewise homogeneous porous loads, math-

emational models of their main technological modes are formed: filtration, backwashing, chemical regeneration and direct washing, taking into account the influence of temperature effects on the internal kinetics of mass transfer while maintaining constant speeds of the respective modes. Given that in the filtration mode the convective components of heat and mass transfer and physical and chemical adsorption prevail over the contribution of diffusion and physical desorption, in the chemical regeneration mode the convective components of heat and mass transfer and physical and chemical desorption prevail over the contribution of diffusion and physical adsorption. modes of reverse and direct washing convective components of heat and mass transfer and physical desorption and chemical adsorption prevail over the contribution of diffusion and physical adsorption, algorithms of numerical-asymptotic approximations of solutions of corresponding nonlinear singularly perturbed boundary value problems, bounded by given, smooth, orthogonal to each other along the edges, two equipotential surfaces and one flow surface and divided into several subregions by some given equipotential surfaces. The proposed models in the complex by taking into account the effect of changes in temperature and filtration flow rate along the filter height on the coefficients that characterize the mass transfer rates during physical and chemical adsorption and desorption, filtration coefficient, allow computer experiments to better investigate changes in impurity concentrations in filtration flow and on the surface of the loading adsorbent, retained by physical and chemical adsorption, filtration flow temperature, filtration coefficient and active porosity in each loading layer along the filter height and based on them predict more optimal use of adsorbents of each loading layer and time intervals of filters, respectively, in filtration, backwash, chemical regeneration and direct washing with constant speeds of the respective modes.

**Key words:** *mathematical model, prediction, filtration, washing, chemical regeneration, impurity, adsorption, desorption, temperature, rapid cone-shaped filter, piecewise homogeneous porous load.*

Отримано: 28.05.2020