

УДК 517.95

DOI: 10.32626/2308-5916.2019-20.51-68

Ю. Є. Климяк*, канд. техн. наук,

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

* Міжнародний економіко-гуманітарний університет
імені академіка Степана Дем'янчука, м. Рівне,

**Національний університет водного господарства
і природокористування, м. Рівне

КОМП'ЮТЕРНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ АДСОРБЦІЙНОЇ ДООЧИСТКИ ВОДИ ВІД ДОМІШОК У ШВИДКИХ БАГАТОШАРОВИХ ФІЛЬТРАХ КОНУСОПОДІБНОЇ ФОРМИ

У статі сформовано математичну модель для комп'ютерного прогнозування процесу адсорбційної доочистки води від домішок у швидких багатошарових фільтрах при додержанні сталої швидкості фільтрування 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, адсорбції, десорбції). Відповідна модельна задача містить рівняння руху фільтраційного потоку згідно із законом Дарсі, рівняння нерозривності, рівняння балансу маси та тепла і рівняння для дослідження зміни характеристик кусково-однорідних пористих завантажень (коефіцієнтів фільтрації та активної пористості). За умови, що конвективні складові тепло- і масоперенесення й адсорбція переважають над вкладом дифузії й десорбції, отримано алгоритм числово-асимптотичного наближення розв'язку відповідної нелінійної сингулярно-збуреної крайової задачі для модельної області конусоподібної форми, обмеженої двома екіпотенціальними поверхнями і поверхнею течії та розділеної деякими заданими екіпотенціальними поверхнями на кілька підобластей. Запропонована модель дозволяє шляхом проведення комп'ютерних експериментів дослідити зміну характеристик кусково-однорідних пористих завантажень (коефіцієнтів фільтрації і активної пористості фільтрувальних матеріалів у кожному шарі), спрогнозувати оптимальні варіанти використання адсорбентів і збільшення тривалості роботи фільтрів за рахунок вибору їх форми та висоти шарів з урахуванням впливу на процес адсорбційної доочистки води не лише зміни швидкості фільтраційного потоку вздовж висоти фільтру, але й температури.

Ключові слова: *математична модель, комп'ютерне прогнозування, процес доочистки води, домішка, адсорбція, температура, кусково-однорідне пористе завантаження, швидкий багатошаровий фільтр, конусоподібна форма.*

Вступ. Адсорбцію широко застосовують для глибокої очистки води від різних домішок [1, 2]. Швидкі фільтри або колони для адсорбційної доочистки питної води зазвичай використовують на заключній стадії водопідготовки, коли з неї відстоюванням, фільтрацією, коагуляцією вже видалена основна частина домішок [3–7]. Принцип роботи швидких фільтрів заснований на напірній фільтрації води через один або кілька шарів зернистих матеріалів — адсорбентів, які служать для видалення як механічних домішок за рахунок сил адгезії–суфозії і інерційної взаємодії, так і розчинених домішок за рахунок адсорбції. Як адсорбенти використовують природні (бентоніт, монтморилоніт, торф), штучні (активоване вугілля, штучні цеоліти, полісорби) та синтетичні матеріали (наноструктуровані вуглецеві сорбенти) [8]. Безперервне регулювання швидкості фільтрування є основою для досягнення оптимального технологічного режиму роботи фільтрів. Підтримка постійної заданої швидкості фільтрування може бути досягнуто лише за допомогою автоматичного регулювання. Постійна швидкість фільтрування досягається збільшенням відкриття засувки на трубопроводі фільтрату в міру збільшення опору завантаження фільтра через накопичення в ньому частинок домішок. Коли засувка відкрита повністю, фільтр вимикається з роботи для промивання. 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].

Постійно зростаючі потреби у господарстві в очищеній воді та зростання вартості фільтрувальних матеріалів (адсорбентів) вимагають проведення досліджень їх більш оптимального використання і збільшення тривалості роботи фільтрів за рахунок вибору їх форми та висоти шарів, зокрема, з урахуванням впливу на процес адсорбційної доочистки води зміни температури фільтраційного потоку вздовж висоти фільтру.

Аналіз останніх досліджень. Швидкість процесу адсорбції залежить від концентрації, природи і структури домішок, швидкості фільтрування та температури фільтраційного потоку, виду і властивостей адсорбенту [10, 11]. У загальному випадку процес адсорбції складається з трьох стадій: переносу домішок до поверхні зерен адсорбенту (зовнішньо-дифузійна область), власне адсорбційного процесу, переносу домішок всередині зерен адсорбенту (внутрішньо-дифузійна область). Прийнято вважати, що швидкість власне адсорбції велика і не лімітує загальної швидкості процесу. Отже, лімітуючою стадією може бути зовнішня або внутрішня дифузія. У деяких випадках процес лімітується обома цими стадіями. У зовнішньо-дифузійній області швидкість масопереносу переважно визначається інтенсивністю фільтраційного

поток, що передусім залежить від швидкості фільтрації води. У середньо-дифузійній області інтенсивність масопереносу залежить від виду і розмірів пор адсорбенту, форм і розмірів його зерен, розміру молекул адсорбуючих речовин, коефіцієнта масопровідності.

Адсорбція — процес оборотний, тобто адсорбована домішка (адсорбат) може переходити з адсорбенту назад у фільтраційний потік. За інших рівних умов швидкості протікання прямого (сорбція) і зворотного (десорбція) процесів пропорційні концентрації домішок у фільтраційному потоці і на поверхні зерен адсорбенту.

Адсорбція — процес екзотермічний і, отже, зниження температури має сприяти швидкості його протікання. Підвищення температури сприяє десорбції, внаслідок чого кількість адсорбованої домішки зменшується. У процесі фізичної адсорбції зазвичай виділяється 8–40 кДж теплоти на 1 моль адсорбованої домішки. Теплота хемосорбції, як правило, перевищує 80 кДж / моль. Для кожної температури існує свій стан рівноваги. Чим вища концентрація адсорбата, тим більша адсорбція, а чим вища температура, тим менша фізична адсорбція.

Як показує аналіз літературних джерел, зокрема [12–19], суттєвий вклад у розробку теоретичних основ доочистки рідин від домішок шляхом їх фільтрування через пористі завантаження зробило багато як вітчизняних, так і зарубіжних вчених. Відмітимо, що в якості математичної моделі процесу доочистки рідини від домішок вітчизняними дослідниками найчастіше використовується модель Д. М. Мінца [13] при сталій швидкості фільтрування та температурі або деяка її модифікація (вдосконалена модель).

У [20] запропоновано її просторове узагальнення для прогнозування процесу доочистки води від домішок у швидких багат шарових криволінійних фільтрах 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 додаткового рівняння для визначення зміни активної пористості завантаження вздовж висоти фільтру, врахування дифузії у фільтраційному потоці і на поверхні зерен завантаження. У [21] вона вдосконалена шляхом введення додаткового рівняння для визначення зміни коефіцієнта фільтрації завантаження вздовж висоти фільтру, зокрема, отримані у роботі результати числових експериментів підтвердили необхідність врахування у моделях зміни характеристик кусково-однорідних пористих завантажень. У [22] запропоновано просторове узагальнення моделі Д. М. Мінца для прогнозування процесу доочистки води від домішок у швидких фільтрах конусоподібної форми при додержанні сталої швидкості фільтрування. Актуальною задачею є узагальнення відповідної

моделі для комп'ютерного прогнозування процесу адсорбційної доочистки води від домішок у швидких багатошарових фільтрах з урахуванням зміни температури фільтраційного потоку вздовж висоти фільтру при додержанні сталої швидкості фільтрації, оскільки дозволить шляхом проведення комп'ютерних експериментів дослідити зміну характеристик кусково-однорідних пористих завантажень (коефіцієнтів фільтрації та активної пористості фільтрувальних матеріалів у кожному шарі), спрогнозувати оптимальні варіанти використання адсорбентів і збільшення тривалості роботи фільтрів за рахунок вибору їх форми та висоти шарів з урахуванням не лише зміни швидкості фільтраційного потоку вздовж висоти фільтру, але й температури.

Математична модель. Змодельовано процес адсорбційної доочистки води від домішок у швидкому багатошаровому фільтрі конусоподібної форми із кусково-однорідним пористим завантаженням — просторовій однозв'язній області G_z ($z = (x, y, z)$), обмеженій гладкими, ортогональними між собою по ребрах, двома еквіпотенціальними поверхнями S_* , S^* і поверхнею течії S^{**} та розділеній деякими заданими $p-1$ еквіпотенціальними поверхнями S_{*r}^* ($r = \overline{1, p-1}$) на p підобластей G_z^r ($r = \overline{1, p}$) (рис. 1, а). Вважаємо, що конвективні складові масоперенесення й адсорбція переважають над вкладом дифузії й десорбції. Крім того, у зв'язку зі зміною температури фільтраційного потоку за рахунок адсорбційних і десорбційних процесів враховується вплив температурних ефектів на внутрішню кінетику масопереносу. Таким чином, для області $G = G_z \times (0, \infty)$ відповідна просторова модельна задача 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, пористості, адсорбції, десорбції) складатиметься з систем рівнянь:

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

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

які доповнюються наступними крайовими умовами:

$$\left\{ \varphi|_{S_*} = \varphi_*, \varphi|_{S^*} = \varphi^*, \varphi'_n|_{S^{**}} = 0, \right. \quad (3)$$

$$\left\{ C|_{S_r} = C_r^*, C'_n|_{S_r} = 0, C'_n|_{S_r} = 0, \right. \quad (4)$$

$$\left\{ U|_{S_r} = u_r^*, U'_n|_{S_r} = 0, U'_n|_{S_r} = 0, \right. \quad (5)$$

$$\left\{ T|_{S_r} = T_r^*, T'_n|_{S_r} = 0, T'_n|_{S_r} = 0, \right. \quad (6)$$

початковими умовами:

$$\left\{ C|_{t=0} = c_0^0, U|_{t=0} = u_0^0, T|_{t=0} = T_0^0, \kappa|_{t=0} = \kappa_0^0, \sigma|_{t=0} = \sigma_0^0 \right. \quad (7)$$

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

$$\left\{ \varphi|_{S_{r-}} = \varphi|_{S_{r+}} = \varphi_{r,r}^*, \kappa_r^0 \cdot \varphi'_n|_{S_{r-}} = \kappa_r^0 \cdot \varphi'_n|_{S_{r+}}, r = \overline{1, p-1}, \right. \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{aligned} C|_{S_{r-}} &= C|_{S_{r+}}, D_r \cdot C'_n - v_{rn}^0 \cdot C|_{S_{r-}} = D_{r+1} \cdot C'_n - v_{rn}^0 \cdot C|_{S_{r+}}, \\ U|_{S_{r-}} &= U|_{S_{r+}}, D_r^* \cdot U'_n|_{S_{r-}} = D_{r+1}^* \cdot U'_n|_{S_{r+}}, \\ T|_{S_{r-}} &= T|_{S_{r+}}, D_r \cdot T'_n - v_{rn}^0 \cdot T|_{S_{r-}} = D_{r+1} \cdot T'_n - v_{rn}^0 \cdot T|_{S_{r+}}, \\ D_r \cdot C'_n - v_{rn} \cdot C + D_r^* \cdot U'_n|_{S_{r-}} &= D_{r+1,j} \cdot C'_n - v_{rn} \cdot C_j + D_{r+1}^* \cdot U'_n|_{S_{r+}}, \\ (\sigma \cdot (C + U))'_n|_{S_{r-}} &= (\sigma \cdot (C + U))'_n|_{S_{r+}}, r = \overline{1, p-1}, \end{aligned} \right. \quad (9)$$

де $\varphi = \varphi(x, y, z)$ і $\vec{v} = \vec{v}(v_x, v_y, v_z)$ — відповідно потенціал і вектор

швидкості фільтрації, $0 \leq \varphi_* = \varphi_{*0}^* < \varphi_{*1}^* < \dots < \varphi_{*p-1}^* < \varphi_{*p}^* = \varphi_*^* < \infty$, φ_*

і φ_*^* — задані дійсні числа, $\varphi_{*1}^*, \varphi_{*2}^*, \dots, \varphi_{*(p-1)}^*$ — невідомі значення

потенціалу, $v = |\vec{v}| = \sqrt{v_x^2(x, y, z) + v_y^2(x, y, z) + v_z^2(x, y, z)} \gg 0$, κ_0^0 —

початковий коефіцієнт фільтрації, $\kappa_0^0 = \{\kappa_r^0, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}$,

$\kappa_r^0 > 0$ ($r = \overline{1, p}$), \vec{n} — зовнішня нормаль до відповідної поверхні,

$C = C(x, y, z, t)$ і $U = U(x, y, z, t)$ — концентрації домішок відповідно

у фільтраційному потоці і на поверхні адсорбенту завантаження,

$T = T(x, y, z, t)$ — температура фільтраційного потоку в точці (x, y, z)

у момент часу t , $\kappa = \kappa(x, y, z, t)$ — коефіцієнт фільтрації,

$\sigma = \sigma(x, y, z, t)$ — активна пористість, D і D^* — коефіцієнти дифузії

домішок відповідно у фільтраційному потоці і на поверхні адсорбенту

завантаження, $D = \{D_r, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}$, $D_r = \varepsilon \cdot d_{r,0}$,

$d_{r,0} > 0$ ($r = \overline{1, p}$), $D^* = \{D_r^*, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}$, $D_r^* = \varepsilon \cdot d_{r,0}^*$,

$d_{r,0}^* > 0$ ($r = \overline{1, p}$), D^{**} — коефіцієнт температуропровідності фільтраційного потоку, $D^{**} = \{D_r^{**}, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}$, $D_r^{**} = \varepsilon \cdot d_{r,0}^{**}$, $d_{r,0}^{**} > 0$ ($r = \overline{1, p}$), α і β — коефіцієнти, що характеризують відповідно обсяги домішок, адсорбованих на поверхні адсорбенту завантаження та десорбованих з поверхні адсорбенту у фільтраційний потік за одиницю часу, $\alpha = \{\alpha_r, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}$,

$$\alpha_r = \alpha_{r,0,0} + \varepsilon \cdot \alpha_{r,1,0} \cdot v + \varepsilon^2 \cdot \alpha_{r,2,0} \cdot v^2 + \varepsilon \cdot \alpha_{r,0,1} \cdot T + \varepsilon^2 \cdot \alpha_{r,0,2} \cdot T^2 + \varepsilon^2 \cdot \alpha_{r,2,2} \cdot v \cdot T,$$

$$\alpha_{r,s_1,s_2} \in \mathbb{R} \quad (r = \overline{1, p}, s_1 = \overline{0, 2}, s_2 = \overline{0, 2}),$$

$$\beta = \{\beta_r, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}, \beta_r = \varepsilon \cdot \bar{\beta}_r,$$

$$\bar{\beta}_r = \beta_{r,0,0} + \varepsilon \cdot \beta_{r,1,0} \cdot v + \varepsilon^2 \cdot \beta_{r,2,0} \cdot v^2 + \varepsilon \cdot \beta_{r,0,1} \cdot T + \varepsilon^2 \cdot \beta_{r,0,2} \cdot T^2 + \varepsilon^2 \cdot \beta_{r,2,2} \cdot v \cdot T, \beta_{r,s_1,s_2} \in \mathbb{R}$$

$$(r = \overline{1, p}, s_1 = \overline{0, 2}, s_2 = \overline{0, 2}),$$

γ — коефіцієнт, що характеризує швидкість зміни температури фільтраційного потоку за рахунок протікання адсорбційних і десорбційних процесів, $\gamma = \{\gamma_r, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}$, $\gamma_r = \varepsilon \cdot \bar{\gamma}_r$ ($r = \overline{1, p}$), μ і λ — коефіцієнти, що характеризують відповідно швидкість зміни коефіцієнта фільтрації й активної пористості завантаження за рахунок адсорбції домішок, $\mu = \{\mu_r, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}$, $\mu_r = \varepsilon \cdot \bar{\mu}_r$, $\bar{\mu}_r = \mu_{r,0} + \varepsilon \cdot \mu_{r,1} \cdot T + \varepsilon^2 \cdot \mu_{r,2} \cdot T^2$, $\mu_{r,s} \in \mathbb{R}$ ($r = \overline{1, p}, s = \overline{0, 2}$), $\lambda = \{\lambda_r, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}$, $\lambda_r = \varepsilon \cdot \bar{\lambda}_r$ ($r = \overline{1, p}$), $\alpha_r = \alpha_r(x, y, z, t)$, $\bar{\beta}_r = \bar{\beta}_r(x, y, z, t)$, $\bar{\gamma}_r = \bar{\gamma}_r(x, y, z, t)$, $\bar{\mu}_r = \bar{\mu}_r(x, y, z, t)$, $\bar{\lambda}_r = \bar{\lambda}_r(x, y, z, t)$ — неперервні обмежені функції ($r = \overline{1, p}$), ε — малий параметр ($\varepsilon > 0$),

$$c_0^0 = \{c_r^0, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}, u_0^0 = \{u_r^0, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\},$$

$$T_0^0 = \{T_r^0, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}, \sigma_0^0 = \{\sigma_r^0, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\},$$

$$c_*^* = c_*^*(M, t), c_r^0 = c_r^0(x, y, z), u_*^* = u_*^*(M, t), u_r^0 = u_r^0(x, y, z),$$

$$T_*^* = T_*^*(M, t), T_r^0 = T_r^0(x, y, z), \sigma_r^0 = \sigma_r^0(x, y, z) \quad (r = \overline{1, p}) —$$

достатньо гладкі функції, узгоджені між собою на ребрах області G [23], $M \in S_*$, $v_{r,n}^0$ і $v_{r,n}$ ($r = \overline{1, p-1}$) — відповідно початкові і поточні нормальні складові швидкості на поверхнях розділу S_{*r}^* ($r = \overline{1, p-1}$).

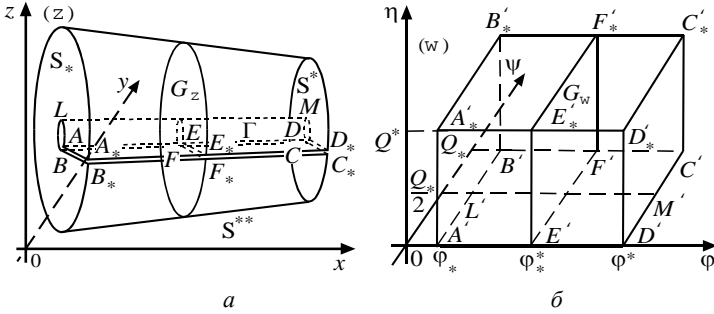


Рис. 1. Просторова двошарова модельна область:

a — область фільтрації G_z з умовним розрізом Γ (конусоподібний фільтр);
b — область комплексного потенціалу G_w

Аналогічно [23] шляхом фіксації на поверхні S_* деякої точки A ($A = B$) та послідовного виконання умовних розрізів $\Gamma_1 = ALMDBLMC$ і $\Gamma_2 = ADD_*A_*BCC_*D_*$ вздовж відповідних поверхонь течії (для зручності позначимо $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2$) задача (1) — (9) зводиться до розв’язання в однозв’язній кусково-однорідній області $G_z \setminus \Gamma$ — криволінійному паралелепіпеді $ABCD_*A_*B_*C_*D_*$, обмеженому двома екіпотенціальними поверхнями ABB_*A_* , CDD_*C_* і чотирма поверхнями течії $ABCD = ALMD \cup BLMC$, $A_*B_*C_*D_*$, ADD_*A_* , BCC_*B_* та розділеному екіпотенціальними поверхнями $E_r F_r F_{*r} E_{*r}$ ($r = 1, p-1$) на деякі p підобластей

$$G_z^1 \setminus \Gamma^1 = ABF_1 E_1 A_* B_* F_{*1} E_{*1}, \dots,$$

$$G_z^p \setminus \Gamma^p = E_{p-1} F_{p-1} C D E_{*(p-1)} F_{*(p-1)} C_* D_*$$

$$(\Gamma^1 = AE_1 E_{*1} A_* BF_1 F_{*1} B_*, \dots, \Gamma^p = E_{p-1} DD_* E_{*(p-1)} F_{p-1} CC_* F_{*(p-1)})$$

(рис. 1, *a*), які є гладкими і ортогональними між собою в кутових точках та вздовж ребер, з додаванням умови непроникності $\varphi'_n|_{\Gamma} = 0$ вздовж розрізу Γ задачі, що описується системами рівнянь (1), (2) з наступними крайовими умовами:

$$\begin{cases} \varphi|_{ABB_*A_*} = \varphi_*, \varphi|_{CDD_*C_*} = \varphi^*, \\ \varphi'_n|_{ABCD \cup A_*B_*C_*D_* \cup ADD_*A_* \cup BCC_*B_*} = 0, \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} C|_{ABB_*A_*} = c^*, C'_n|_{CDD_*C_*} = 0, \\ C'_n|_{ADD_*A_* \cup BCC_*B_* \cup ABCD \cup A_*B_*C_*D_*} = 0, \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} U \Big|_{ABB,A_s} = u_*^*, U'_n \Big|_{CDD,C_s} = 0, \\ U'_n \Big|_{ADD,A_s \cup BCC,B_s \cup ABCD \cup A,B,C,D_s} = 0, \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} T \Big|_{ABB,A_s} = T_*^*, T'_n \Big|_{CDD,C_s} = 0, \\ T'_n \Big|_{ADD,A_s \cup BCC,B_s \cup ABCD \cup A,B,C,D_s} = 0, \end{cases} \quad (13)$$

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

$$\begin{cases} \varphi \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r-}} = \varphi \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r+}} = \varphi_{*r}^*, \\ \kappa_r^0 \cdot \varphi'_n \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r-}} = \kappa_{r+1}^0 \cdot \varphi'_n \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r+}}, r = 1, p-1, \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} C \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r-}} = C \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r+}}, \\ D_r \cdot C'_n - v_{rn}^0 \cdot C \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r-}} = D_{r+1} \cdot C'_n - v_{rn}^0 \cdot C \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r+}}, \\ U \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r-}} = U \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r+}}, \\ D_r^* \cdot U'_n \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r-}} = D_{r+1}^* \cdot U'_n \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r+}}, \\ T \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r-}} = T \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r+}}, \\ D_r^{**} \cdot T'_n - v_{rn}^0 \cdot T \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r-}} = D_{r+1}^{**} \cdot T'_n - v_{rn}^0 \cdot T \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r+}}, \\ D_r \cdot C'_n - v_{rn} \cdot C + D_r^* \cdot U'_n \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r-}} = \\ = D_{r+1} \cdot C'_n - v_{rn} \cdot C + D_{r+1}^* \cdot U'_n \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r+}}, \\ (\sigma \cdot (C + U))'_t \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r-}} = (\sigma \cdot (C + U))'_t \Big|_{E_r F_r F_{*r} E_{*r+}}, r = 1, p-1 \end{cases} \quad (15)$$

і подальшого «склеювання» берегів умовного розрізу Γ із використанням умов:

$$\begin{cases} \varphi \Big|_{ALMD} = \varphi \Big|_{BLMC}, \varphi'_n \Big|_{ALMD} = \varphi'_n \Big|_{BLMC}, \\ \varphi \Big|_{ADD,A_s} = \varphi \Big|_{BCC,B_s}, \varphi'_n \Big|_{ADD,A_s} = \varphi'_n \Big|_{BCC,B_s} \end{cases} \quad (16)$$

та узгодженості величин концентрацій домішки у фільтраційному потоці і на поверхні адсорбенту завантаження, значень температури на умовних поверхнях розрізу із використанням умов:

$$\begin{cases} C \Big|_{ALMD} = C \Big|_{BLMC}, C'_n \Big|_{ALMD} = C'_n \Big|_{BLMC}, \\ C \Big|_{ADD,A_s} = C \Big|_{BCC,B_s}, C'_n \Big|_{ADD,A_s} = C'_n \Big|_{BCC,B_s}, \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} U \Big|_{ALMD} = U \Big|_{BLMC}, U'_n \Big|_{ALMD} = U'_n \Big|_{BLMC}, \\ U \Big|_{ADD,A_s} = U \Big|_{BCC,B_s}, U'_n \Big|_{ADD,A_s} = U'_n \Big|_{BCC,B_s}, \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} T|_{ALMD} = T|_{BLMC}, T'_n|_{ALMD} = T'_n|_{BLMC}, \\ T|_{ADD,A_s} = T|_{BCC,B_s}, T'_n|_{ADD,A_s} = T'_n|_{BCC,B_s}. \end{cases} \quad (19)$$

Аналогічно [20–22] шляхом введення пари функцій $\psi = \psi(x, y, z)$, $\eta = \eta(x, y, z)$ (просторово комплексно спряжених із функцією $\varphi(x, y, z)$) таких, що $\kappa_0^0 \cdot grad \varphi = grad \psi \times grad \eta$ [24] і заміною останніх чотирьох з граничних умов (10) на умови: $\psi|_{ADD,A_s} = 0$, $\psi|_{BCC,B_s} = Q_*$, $\eta|_{ABCD} = 0$, $\eta|_{A,B,C,D_s} = Q^*$, задача (1), (10), (14), (16) замінюється більш загальною прямою задачею на знаходження просторового аналогу кусково-конформного відображення однозв'язної області $G_z \setminus \Gamma$ на відповідну область комплексного потенціалу — прямокутний паралелепіпед $G_w = A'B'C'D'A'_sB'_sC'_sD'_s$, який розділений поверхнями $E'_r F'_r E'_{*r} F'_{*r}$ ($r = \overline{1, p}$) на деякі p підобластей

$$\begin{aligned} G_w^1 &= A'B'E'_1 F'_1 A'_s B'_s E'_s F'_s, G_w^r = E'_r F'_r F'_{r+1} E'_{r+1} E'_{*r} F'_{*r} F'_{*r+1} E'_{*r+1} \\ & \quad (r = \overline{2, p-2}), G_w^p = E'_{p-1} F'_{p-1} C'D'E'_{*p-1} F'_{*p-1} C'_s D'_s \end{aligned}$$

(рис. 1, б), де $G_w^r = \{w = (\varphi, \psi, \eta) : \varphi_{*(r-1)}^* < \varphi < \varphi_{*r}^*, 0 < \psi < Q_*, 0 < \eta < Q^*\}$ ($r = \overline{1, p}$), φ_{*r}^* ($r = \overline{1, p-1}$), Q_* , Q^* — невідомі параметри, $Q = Q_* \cdot Q^*$ — повна фільтраційна витрата, і наступного «склеювання» берегів умовного розрізу Γ . Алгоритм розв'язання цієї задачі отримано в [25], зокрема, знайдено поле швидкостей \tilde{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 рівнянні (2) та умовах (11)–(13), (7), (15), (17)–(19) отримаємо відповідну задачу для області $G_w \times (0, \infty)$:

$$\begin{cases} (\tilde{\sigma} \cdot c)'_t = D \cdot (b_1 \cdot c''_{\varphi\varphi} + b_2 \cdot c''_{\psi\psi} + b_3 \cdot c''_{\eta\eta} + b_4 \cdot c'_\psi + b_5 \cdot c'_\eta) - \frac{\tilde{v}^2}{\kappa} \cdot c'_\varphi - \tilde{\alpha} \cdot c + \tilde{\beta} \cdot u, \\ (\tilde{\sigma} \cdot u)'_t = D^* \cdot (b_1 \cdot u''_{\varphi\varphi} + b_2 \cdot u''_{\psi\psi} + b_3 \cdot u''_{\eta\eta} + b_4 \cdot u'_\psi + b_5 \cdot u'_\eta) + \tilde{\alpha} \cdot c - \tilde{\beta} \cdot u, \\ (\tilde{\sigma} \cdot \tilde{T})'_t = D^{**} \cdot (b_1 \cdot \tilde{T}''_{\varphi\varphi} + b_2 \cdot \tilde{T}''_{\psi\psi} + b_3 \cdot \tilde{T}''_{\eta\eta} + b_4 \cdot \tilde{T}'_\psi + b_5 \cdot \tilde{T}'_\eta) - \\ - \frac{\tilde{v}^2}{\kappa} \cdot \tilde{T}'_\varphi + \tilde{\gamma} \cdot (\tilde{\alpha} \cdot c - \tilde{\beta} \cdot u), \\ \tilde{\kappa}'_t = -\tilde{\mu} \cdot u, \tilde{\sigma}'_t = -\tilde{\lambda} \cdot u, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^r, r = \overline{1, p}, \end{cases} \quad (20)$$

$$\left\{ c \Big|_{\varphi=\varphi_*} = \tilde{c}_*^*, c'_\varphi \Big|_{\varphi=\varphi_*} = 0, c_\psi \Big|_{\psi=0} = c'_\psi \Big|_{\psi=Q_*} = c'_\eta \Big|_{\eta=0} = c'_\eta \Big|_{\eta=Q_*} = 0, \quad (21) \right.$$

$$\left\{ u \Big|_{\varphi=\varphi_*} = \tilde{u}_*^*, u'_\varphi \Big|_{\varphi=\varphi_*} = 0, u'_\psi \Big|_{\psi=0} = u'_\psi \Big|_{\psi=Q_*} = u'_\eta \Big|_{\eta=0} = u'_\eta \Big|_{\eta=Q_*} = 0, \quad (22) \right.$$

$$\left\{ \tilde{T} \Big|_{\varphi=\varphi_*} = \tilde{T}_*^*, \tilde{T}'_\varphi \Big|_{\varphi=\varphi_*} = 0, \tilde{T}'_\psi \Big|_{\psi=0} = \tilde{T}'_\psi \Big|_{\psi=Q_*} = \tilde{T}'_\eta \Big|_{\eta=0} = \tilde{T}'_\eta \Big|_{\eta=Q_*} = 0, \quad (23) \right.$$

$$\left\{ c \Big|_{t=0} = \tilde{c}_0^0, u \Big|_{t=0} = \tilde{u}_0^0, \tilde{T} \Big|_{t=0} = \tilde{T}_0^0, \tilde{\kappa} \Big|_{t=0} = \kappa_0^0, \tilde{\sigma} \Big|_{t=0} = \tilde{\sigma}_0^0, \quad (24) \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{*r-0}^+} c &= \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{*r+0}^-} c, \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{*r-0}^-} (D_r \cdot c'_\varphi - \kappa_r^0 \cdot c) = \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{*r+0}^+} (D_{r+1} \cdot c'_\varphi - \kappa_{r+1}^0 \cdot c), \\ \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{*r-0}^+} u &= \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{*r+0}^-} u, \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{*r-0}^-} D_r^* \cdot u'_\varphi = \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{*r+0}^+} D_{r+1}^* \cdot u'_\varphi, \\ \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{*r-0}^-} \tilde{T} &= \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{*r+0}^+} \tilde{T}, \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{*r-0}^-} (D_r^{**} \cdot \tilde{T}'_\varphi - \kappa_r^0 \cdot \tilde{T}) = \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{*r+0}^+} (D_{r+1}^{**} \cdot \tilde{T}'_\varphi - \kappa_{r+1}^0 \cdot \tilde{T}), \\ \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{*r-0}^+} (D_r \cdot c'_\varphi - \tilde{\kappa}_r \cdot c + D_r^* \cdot u'_\varphi) &= \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{*r+0}^-} (D_{r+1} \cdot c'_\varphi - \tilde{\kappa}_{r+1} \cdot c + D_{r+1}^* \cdot u'_\varphi), \\ \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{*r-0}^-} (\tilde{\sigma} \cdot (c + u))'_t &= \lim_{\varphi \rightarrow \varphi_{*r+0}^+} (\tilde{\sigma} \cdot (c + u))'_t, \quad r = \overline{1, p-1}, \end{aligned} \quad (25) \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} c \Big|_{\eta=0, \psi=\tilde{\psi}} &= c \Big|_{\eta=0, \psi=Q_*-\tilde{\psi}}, c'_\eta \Big|_{\eta=0, \psi=\tilde{\psi}} = c'_\eta \Big|_{\eta=0, \psi=Q_*-\tilde{\psi}}, \\ c \Big|_{\psi=0} &= c \Big|_{\psi=Q_*}, c'_\eta \Big|_{\psi=0} = c'_\eta \Big|_{\psi=Q_*}, \end{aligned} \quad (26) \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} u \Big|_{\eta=0, \psi=\tilde{\psi}} &= u \Big|_{\eta=0, \psi=Q_*-\tilde{\psi}}, u'_\eta \Big|_{\eta=0, \psi=\tilde{\psi}} = u'_\eta \Big|_{\eta=0, \psi=Q_*-\tilde{\psi}}, \\ u \Big|_{\psi=0} &= u \Big|_{\psi=Q_*}, u'_\eta \Big|_{\psi=0} = u'_\eta \Big|_{\psi=Q_*}, \end{aligned} \quad (27) \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \tilde{T} \Big|_{\eta=0, \psi=\tilde{\psi}} &= \tilde{T} \Big|_{\eta=0, \psi=Q_*-\tilde{\psi}}, \tilde{T}'_\eta \Big|_{\eta=0, \psi=\tilde{\psi}} = \tilde{T}'_\eta \Big|_{\eta=0, \psi=Q_*-\tilde{\psi}}, \\ \tilde{T} \Big|_{\psi=0} &= \tilde{T} \Big|_{\psi=Q_*}, \tilde{T}'_\eta \Big|_{\psi=0} = \tilde{T}'_\eta \Big|_{\psi=Q_*}, \end{aligned} \quad (28) \right.$$

де

$$\begin{aligned} c &= c(\varphi, \psi, \eta, t) = C(x(\varphi, \psi, \eta), y(\varphi, \psi, \eta), z(\varphi, \psi, \eta), t), \quad u = u(\varphi, \psi, \eta, t), \\ \tilde{T} &= \tilde{T}(\varphi, \psi, \eta, t), \quad \tilde{\kappa} = \tilde{\kappa}(\varphi, \psi, \eta, t), \quad \tilde{\sigma} = \tilde{\sigma}(\varphi, \psi, \eta, t), \quad \tilde{c}_*^* = \tilde{c}_*^*(\psi, \eta, t), \\ \tilde{u}_*^* &= \tilde{u}_*^*(\psi, \eta, t), \quad \tilde{T}_*^* = \tilde{T}_*^*(\psi, \eta, t), \quad \tilde{c}_0^0 = \{\tilde{c}_r^0, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^r, r = \overline{1, p}\}, \\ \tilde{u}_0^0 &= \{\tilde{u}_r^0, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^r, r = \overline{1, p}\}, \quad \tilde{T}_0^0 = \{\tilde{T}_r^0, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^r, r = \overline{1, p}\}, \\ \tilde{\sigma}_0^0 &= \{\tilde{\sigma}_r^0, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^r, r = \overline{1, p}\}, \quad \tilde{\alpha} = \{\tilde{\alpha}_r, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^r, r = \overline{1, p}\}, \\ \tilde{\beta} &= \{\tilde{\beta}_r, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^r, r = \overline{1, p}\}, \quad \tilde{\gamma} = \{\tilde{\gamma}_r, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^r, r = \overline{1, p}\}, \\ \tilde{\mu} &= \{\tilde{\mu}_r, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^r, r = \overline{1, p}\}, \quad \tilde{\lambda} = \{\tilde{\lambda}_r, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^r, r = \overline{1, p}\}, \\ \tilde{\nu} &= \{\tilde{\nu}_r, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^r, r = \overline{1, p}\}, \quad b_s = \{b_{r,s}, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^r, r = \overline{1, p}\} \\ & \quad (s = \overline{1, 5}), \quad \tilde{\alpha}_r = \alpha_{r,0,0} + \varepsilon \cdot \alpha_{r,1,0} \cdot \tilde{\nu} + \varepsilon^2 \cdot \alpha_{r,2,0} \cdot \tilde{\nu}^2 + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & +\varepsilon \cdot \alpha_{r,0,1} \cdot \tilde{T} + \varepsilon^2 \cdot \alpha_{r,0,2} \cdot \tilde{T}^2 + \varepsilon^2 \cdot \alpha_{r,0,2} \cdot \tilde{v} \cdot \tilde{T}, \quad \tilde{\beta}_r = \varepsilon \cdot \tilde{\tilde{\beta}}_r, \\
 \tilde{\beta}_r & = \beta_{r,0,0} + \varepsilon \cdot \beta_{r,1,0} \cdot \tilde{v} + \varepsilon^2 \cdot \beta_{r,2,0} \cdot \tilde{v}^2 + \varepsilon \cdot \beta_{r,0,1} \cdot \tilde{T} + \varepsilon^2 \cdot \beta_{r,0,2} \cdot \tilde{T}^2 + \\
 & + \varepsilon^2 \cdot \beta_{r,2,2} \cdot \tilde{v} \cdot \tilde{T}, \quad \tilde{\gamma}_r = \varepsilon \cdot \tilde{\tilde{\gamma}}_r, \quad \tilde{\mu}_r = \varepsilon \cdot \tilde{\tilde{\mu}}_r, \\
 \tilde{\mu}_r & = \mu_{r,0} + \varepsilon \cdot \mu_{r,1} \cdot \tilde{T} + \varepsilon^2 \cdot \mu_{r,2} \cdot \tilde{T}^2, \quad \tilde{\lambda}_r = \varepsilon \cdot \tilde{\tilde{\lambda}}_r, \quad \tilde{c}_r^0 = \tilde{c}_r^0(\varphi, \psi, \eta), \\
 \tilde{u}_r^0 & = \tilde{u}_r^0(\varphi, \psi, \eta), \quad \tilde{T}_r^0 = \tilde{T}_r^0(\varphi, \psi, \eta), \quad \tilde{\sigma}_r^0 = \tilde{\sigma}_r^0(\varphi, \psi, \eta), \quad \tilde{\alpha}_r = \tilde{\alpha}_r(\varphi, \psi, \eta, t), \\
 \tilde{\beta}_r & = \tilde{\tilde{\beta}}_r(\varphi, \psi, \eta, t), \quad \tilde{\gamma}_r = \tilde{\tilde{\gamma}}_r(\varphi, \psi, \eta, t), \quad \tilde{\mu}_r = \tilde{\tilde{\mu}}_r(\varphi, \psi, \eta, t), \\
 \tilde{\lambda}_r & = \tilde{\tilde{\lambda}}_r(\varphi, \psi, \eta, t), \quad \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}, \quad s = \overline{1, 5}), \quad b_{r,1} = \varphi_x'^2 + \varphi_y'^2 + \varphi_z'^2 = \tilde{v}_r^2 / (\kappa_r^0)^2, \\
 b_{r,2} & = \psi_x'' + \psi_y'' + \psi_z'', \quad b_{r,3} = \eta_x'' + \eta_y'' + \eta_z'', \quad b_{r,4} = \psi_{xx}'' + \psi_{yy}'' + \psi_{zz}'', \\
 b_{r,5} & = \eta_{xx}'' + \eta_{yy}'' + \eta_{zz}'', \quad \tilde{\psi} \in [0, \frac{Q_*}{2}].
 \end{aligned}$$

Розв'язання задачі. Аналогічно до [19–23] знайдено числово-асимптотичне наближення розв'язку $c = \{c_r, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^r, r = \overline{1, p}\}$, $u = \{u_r, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^r, r = \overline{1, p}\}$, $\tilde{T} = \{\tilde{T}_r, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^r, r = \overline{1, p}\}$, $\tilde{\kappa} = \{\tilde{\kappa}_r, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^r, r = \overline{1, p}\}$, $\tilde{\sigma} = \{\tilde{\sigma}_r, (\varphi, \psi, \eta) \in G_w^r, r = \overline{1, p}\}$ задачі (20)–(28) з точністю $O(\varepsilon^{n+1})$ у вигляді таких рядів:

$$\begin{aligned}
 c_r & = \sum_{i=0}^n \varepsilon^i \cdot c_{r,i} + \sum_{i=0}^{n+1} \varepsilon^i \cdot (\tilde{P}_{r,i} + \tilde{\tilde{P}}_{r,i}) + \sum_{i=0}^{2n+1} \varepsilon^{i/2} \cdot (\hat{P}_{r,i} + \hat{\tilde{P}}_{r,i} + \check{P}_{r,i} + \check{\tilde{P}}_{r,i}) + \bar{R}_{r,n+1}, \\
 u_r & = \sum_{i=0}^n \varepsilon^i \cdot u_{r,i} + \sum_{i=0}^{n+1} \varepsilon^i \cdot (\tilde{H}_{r,i} + \tilde{\tilde{H}}_{r,i}) + \sum_{i=0}^{2n+1} \varepsilon^{i/2} \cdot (\hat{H}_{r,i} + \hat{\tilde{H}}_{r,i} + \check{H}_{r,i} + \check{\tilde{H}}_{r,i}) + \bar{R}_{r,n+1}, \\
 \tilde{T}_r & = \sum_{i=0}^n \varepsilon^i \cdot \tilde{T}_{r,i} + \sum_{i=0}^{n+1} \varepsilon^i \cdot (\tilde{B}_{r,i} + \tilde{\tilde{B}}_{r,i}) + \sum_{i=0}^{2n+1} \varepsilon^{i/2} \cdot (\hat{B}_{r,i} + \hat{\tilde{B}}_{r,i} + \check{B}_{r,i} + \check{\tilde{B}}_{r,i}) + \bar{R}_{r,n+1}, \\
 \tilde{\kappa}_r & = \sum_{i=0}^n \varepsilon^i \cdot \tilde{\kappa}_{r,i} + \sum_{i=0}^{n+1} \varepsilon^i \cdot (\tilde{q}_{r,i} + \tilde{\tilde{q}}_{r,i}) + \sum_{i=0}^{2n+1} \varepsilon^{i/2} \cdot (\hat{q}_{r,i} + \hat{\tilde{q}}_{r,i} + \check{q}_{r,i} + \check{\tilde{q}}_{r,i}) + \bar{R}_{r,n+1}, \\
 \tilde{\sigma}_r & = \sum_{i=0}^n \varepsilon^i \cdot \tilde{\sigma}_{r,i} + \sum_{i=0}^{n+1} \varepsilon^i \cdot (\tilde{h}_{r,i} + \tilde{\tilde{h}}_{r,i}) + \sum_{i=0}^{2n+1} \varepsilon^{i/2} \cdot (\hat{h}_{r,i} + \hat{\tilde{h}}_{r,i} + \check{h}_{r,i} + \check{\tilde{h}}_{r,i}) + \bar{R}_{r,n+1},
 \end{aligned}$$

де $c_{r,i} = c_{r,i}(\varphi, \psi, \eta, t)$, $u_{r,i} = u_{r,i}(\varphi, \psi, \eta, t)$, $\tilde{T}_{r,i} = \tilde{T}_{r,i}(\varphi, \psi, \eta, t)$, $\tilde{\kappa}_{r,i} = \tilde{\kappa}_{r,i}(\varphi, \psi, \eta, t)$, $\tilde{\sigma}_{r,i} = \tilde{\sigma}_{r,i}(\varphi, \psi, \eta, t)$ ($r = \overline{1, p}$, $i = \overline{0, n}$) — члени регулярних частин асимптотик,

$$\begin{aligned}
 \tilde{P}_{r,i} &= \tilde{P}_{r,i}(\tilde{\phi}_{r-1}, \psi, \eta, t), \quad \tilde{H}_{r,i} = \tilde{H}_{r,i}(\tilde{\phi}_{r-1}, \psi, \eta, t), \quad \tilde{B}_{r,i} = \tilde{B}_{r,i}(\tilde{\phi}_{r-1}, \psi, \eta, t), \\
 \tilde{q}_{r,i} &= \tilde{q}_{r,i}(\tilde{\phi}_{r-1}, \psi, \eta, t), \quad \tilde{h}_{r,i} = \tilde{h}_{r,i}(\tilde{\phi}_{r-1}, \psi, \eta, t), \quad \tilde{P}_{r,i} = \tilde{P}_{r,i}(\tilde{\phi}_r, \psi, \eta, t), \\
 \tilde{H}_{r,i} &= \tilde{H}_{r,i}(\tilde{\phi}_r, \psi, \eta, t), \quad \tilde{B}_{r,i} = \tilde{B}_{r,i}(\tilde{\phi}_r, \psi, \eta, t), \quad \tilde{q}_{r,i} = \tilde{q}_{r,i}(\tilde{\phi}_r, \psi, \eta, t), \\
 \tilde{h}_{r,i} &= \tilde{h}_{r,i}(\tilde{\phi}_r, \psi, \eta, t) \quad (r = \overline{1, p}, i = \overline{0, n+1}) —
 \end{aligned}$$

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),

$$\begin{aligned}
 \hat{P}_{r,i} &= \hat{P}_{r,i}(\varphi, \tilde{\psi}, \eta, t), \quad \hat{H}_{r,i} = \hat{H}_{r,i}(\varphi, \tilde{\psi}, \eta, t), \quad \hat{B}_{r,i} = \hat{B}_{r,i}(\varphi, \tilde{\psi}, \eta, t), \\
 \hat{q}_{r,i} &= \hat{q}_{r,i}(\varphi, \tilde{\psi}, \eta, t), \quad \hat{h}_{r,i} = \hat{h}_{r,i}(\varphi, \tilde{\psi}, \eta, t), \quad \hat{P}_{r,i} = \hat{P}_{r,i}(\varphi, \tilde{\psi}, \eta, t), \\
 \hat{H}_{r,i} &= \hat{H}_{r,i}(\varphi, \tilde{\psi}, \eta, t), \quad \hat{B}_{r,i} = \hat{B}_{r,i}(\varphi, \tilde{\psi}, \eta, t), \quad \hat{q}_{r,i} = \hat{q}_{r,i}(\varphi, \tilde{\psi}, \eta, t), \\
 \hat{h}_{r,i} &= \hat{h}_{r,i}(\varphi, \tilde{\psi}, \eta, t), \quad \check{P}_{r,i} = \check{P}_{r,i}(\varphi, \psi, \tilde{\eta}, t), \quad \check{H}_{r,i} = \check{H}_{r,i}(\varphi, \psi, \tilde{\eta}, t), \\
 \check{B}_{r,i} &= \check{B}_{r,i}(\varphi, \psi, \tilde{\eta}, t), \quad \check{q}_{r,i} = \check{q}_{r,i}(\varphi, \psi, \tilde{\eta}, t), \quad \check{h}_{r,i} = \check{h}_{r,i}(\varphi, \psi, \tilde{\eta}, t), \\
 \check{P}_{r,i} &= \check{P}_{r,i}(\varphi, \psi, \tilde{\eta}, t), \quad \check{H}_{r,i} = \check{H}_{r,i}(\varphi, \psi, \tilde{\eta}, t), \quad \check{B}_{r,i} = \check{B}_{r,i}(\varphi, \psi, \tilde{\eta}, t), \\
 \check{q}_{r,i} &= \check{q}_{r,i}(\varphi, \psi, \tilde{\eta}, t), \quad \check{h}_{r,i} = \check{h}_{r,i}(\varphi, \psi, \tilde{\eta}, t) \quad (r = \overline{1, p}, i = \overline{0, 2n+1}) —
 \end{aligned}$$

функції типу примежового шару відповідно в околах $\psi = 0$, $\psi = Q_*$, $\eta = 0$, $\eta = Q^*$ (поправки на бічній стінці фільтру і берегах умовного

розрізу Γ), $\tilde{\phi}_r = \frac{\varphi - \varphi_{*r}^*}{\varepsilon} \quad (r = \overline{0, p-1})$, $\tilde{\phi}_r = \frac{\varphi_{*r}^* - \varphi}{\varepsilon} \quad (r = \overline{1, p})$,

$\tilde{\psi} = \frac{\psi}{\sqrt{\varepsilon}}$, $\tilde{\psi} = \frac{Q_* - \psi}{\sqrt{\varepsilon}}$, $\tilde{\eta} = \frac{\eta}{\sqrt{\varepsilon}}$, $\tilde{\eta} = \frac{Q^* - \eta}{\sqrt{\varepsilon}}$ — відповідні їм регуляри-

зуючі перетворення (розтяги), $R_{r,n+1}(\varphi, \psi, \eta, t, \varepsilon)$, $\tilde{R}_{r,n+1}(\varphi, \psi, \eta, t, \varepsilon)$, $\bar{R}_{r,n+1}(\varphi, \psi, \eta, t, \varepsilon)$, $\check{R}_{r,n+1}(\varphi, \psi, \eta, t, \varepsilon)$, $\hat{R}_{r,n+1}(\varphi, \psi, \eta, t, \varepsilon)$ ($r = \overline{1, p}$) —

залишкові члени. Зокрема, для знаходження $c_{r,i}$, $u_{r,i}$, $\tilde{T}_{r,i}$, $\tilde{K}_{r,i}$, $\tilde{\sigma}_{r,i}$

($r = \overline{1, p}$, $i = \overline{0, n}$) одержано формули:

$$c_{r,0} = \begin{cases} e^{-\tilde{\lambda}_{r,1}(\varphi, \psi, \eta, t)} \cdot (\hat{g}_{r,0}(\varphi, \psi, \eta, t) + \tilde{c}_*^*(\psi, \eta, t - \tilde{f}_r(\varphi, \psi, \eta))), & t \geq \tilde{f}_1, \\ e^{-\tilde{\lambda}_{r,1}(\varphi, \psi, \eta, t)} \cdot (\hat{g}_{r,0}(\varphi, \psi, \eta, t) + \tilde{c}_{r-1,0}^*(\psi, \eta, t - \tilde{f}_r(\varphi, \psi, \eta))), & t \geq \tilde{f}_r, \\ e^{-\tilde{\lambda}_{r,2}(\varphi, \psi, \eta, t)} \cdot (\hat{g}_{r,0}(\varphi, \psi, \eta, t) + \tilde{c}_0^0(\tilde{f}_r^{-1}(\tilde{f}_r(\varphi, \psi, \eta) - t, \psi, \eta), \psi, \eta)), & t < \tilde{f}_r, \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
 u_{r,0} &= \frac{1}{\tilde{\sigma}_r^0} \cdot \int_0^t \tilde{g}_{r,i}(\varphi, \psi, \eta, \hat{t}) d\hat{t} + \tilde{u}_r^0, \\
 \tilde{T}_{r,0} &= \begin{cases} \tilde{T}_*^*(\psi, \eta, t - \tilde{f}_r(\varphi, \psi, \eta)), & t \geq \tilde{f}_1, \\ \tilde{T}_{r-1,0}^*(\psi, \eta, t - \tilde{f}_r(\varphi, \psi, \eta)), & t \geq \tilde{f}_r, \\ \tilde{T}_0^0(\tilde{f}_r^{-1}(\tilde{f}_r(\varphi, \psi, \eta) - t, \psi, \eta), \psi, \eta), & t < \tilde{f}_r, \end{cases} \\
 \tilde{\kappa}_{r,0} &= \kappa_r^0, \quad \tilde{\sigma}_{r,0} = \tilde{\sigma}_r^0 \quad (r = \overline{1, p}), \\
 c_{r,i} &= \begin{cases} e^{-\tilde{\lambda}_{r,1}(\varphi, \psi, \eta, t)} \cdot \hat{g}_{r,i}(\varphi, \psi, \eta, t), & t \geq \tilde{f}_r, \\ e^{-\tilde{\lambda}_{r,2}(\varphi, \psi, \eta, t)} \cdot \hat{g}_{r,i}(\varphi, \psi, \eta, t), & t < \tilde{f}_r, \end{cases} \\
 u_{r,i} &= \frac{1}{\tilde{\sigma}_r^0} \cdot \int_0^t \tilde{g}_{r,i}(\varphi, \psi, \eta, \hat{t}) d\hat{t}, \\
 \tilde{T}_{r,i} &= \begin{cases} \kappa_r^0 \cdot \int_{\varphi_{*(r-1)}}^{\varphi} \frac{\bar{g}_{r,i}(\hat{\varphi}, \psi, \eta, \tilde{f}_r(\hat{\varphi}, \psi, \eta) - \tilde{f}_r(\varphi, \psi, \eta) + t)}{\tilde{v}^2(\hat{\varphi}, \psi, \eta)} d\hat{\varphi}, & t \geq \tilde{f}_r, \\ \int_0^t \frac{\bar{g}_{r,i}(\tilde{f}_r^{-1}(\hat{t} + \tilde{f}_r(\varphi, \psi, \eta) - t, \psi, \eta), \psi, \eta, \hat{t})}{\tilde{\sigma}_r^0(\tilde{f}_r^{-1}(\hat{t} + \tilde{f}_r(\varphi, \psi, \eta) - t, \psi, \eta), \psi, \eta)} d\hat{t}, & t < \tilde{f}_r, \end{cases} \\
 \tilde{\kappa}_{r,i} &= \int_0^t \tilde{g}_{r,i}(\varphi, \psi, \eta, \hat{t}) d\hat{t}, \quad \tilde{\sigma}_{r,i} = \int_0^t \tilde{g}_{r,i}(\varphi, \psi, \eta, \hat{t}) d\hat{t} \quad (r = \overline{1, p}, i = \overline{1, n}), \\
 \text{де } \tilde{\lambda}_{r,1}(\varphi, \psi, \eta, t) &= \kappa_r^0 \cdot \alpha_{r,0} \cdot \int_{\varphi_{*(r-1)}}^{\varphi} \frac{d\hat{\varphi}}{\tilde{v}^2(\hat{\varphi}, \psi, \eta)}, \\
 \tilde{\lambda}_{r,2}(\varphi, \psi, \eta, t) &= \alpha_{r,0} \cdot \int_0^t \frac{d\hat{t}}{\tilde{\sigma}_r^0(\tilde{f}_r^{-1}(\hat{t} + \tilde{f}_r(\varphi, \psi, \eta) - t, \psi, \eta), \psi, \eta)}, \\
 \hat{g}_{r,i}(\varphi, \psi, \eta, t) &= \int_{\varphi_{*(r-1)}}^{\varphi} \frac{g_{r,i}(\hat{\varphi}, \psi, \eta, \tilde{f}_r(\hat{\varphi}, \psi, \eta) - \tilde{f}_r(\varphi, \psi, \eta) + t)}{\tilde{v}^2(\hat{\varphi}, \psi, \eta)} \cdot e^{\tilde{\lambda}_{r,1}(\hat{\varphi}, \psi, \eta, t)} d\hat{\varphi}, \\
 \hat{g}_{r,i}(\varphi, \psi, \eta, t) &= \int_0^t \frac{g_{r,i}(\tilde{f}_r^{-1}(\hat{t} + \tilde{f}_r(\varphi, \psi, \eta) - t, \psi, \eta), \psi, \eta, \hat{t})}{\tilde{\sigma}_r^0(\tilde{f}_r^{-1}(\hat{t} + \tilde{f}_r(\varphi, \psi, \eta) - t, \psi, \eta), \psi, \eta)} \cdot e^{\tilde{\lambda}_{r,2}(\varphi, \psi, \eta, \hat{t})} d\hat{t}, \\
 g_{r,i} &= I(i, 1) \cdot (d_{r,0} \cdot (b_{r,1} \cdot c_{(r,i-1)\varphi}'' + b_{r,2} \cdot c_{(r,i-1)\psi\psi}'' + b_{r,3} \cdot c_{(r,i-1)\eta\eta}'' + \\
 &+ b_{r,4} \cdot c_{(r,i-1)\psi}' + b_{r,5} \cdot c_{(r,i-1)\eta}') - \sum_{l=1}^i \alpha_{r,l,0} \cdot \tilde{v}_r^l \cdot c_{r,i-l} - \sum_{l=0}^{i-1} \alpha_{r,0,1} \cdot \tilde{T}_{r,l} \cdot c_{r,i-1-l} +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \sum_{l=0}^{i-1} \beta_{r,l,0} \cdot \tilde{v}_r^l \cdot u_{r,i-1-l} - \sum_{l=1}^i (\tilde{\sigma}_{r,l} \cdot c'_{(r,i-l)t} + \tilde{\sigma}'_{r,l} \cdot c_{r,i-l}) - I(i,2) \times \\
 & \quad \times \left(\sum_{l=0}^{i-2} \sum_{k=0}^l \alpha_{r,0,2} \cdot \tilde{T}_{r,k} \cdot \tilde{T}_{r,l-k} \cdot c_{r,i-2-l} + \right. \\
 & \quad \left. + \sum_{l=0}^{i-2} \alpha_{r,2,2} \cdot \tilde{v}_r \cdot \tilde{T}_{r,l} \cdot c_{r,i-2-l} - \sum_{l=0}^{i-2} \beta_{r,0,1} \cdot \tilde{T}_{r,l} \cdot u_{r,i-2-l} \right) + \\
 & + I(i,3) \cdot \left(\sum_{l=0}^{i-3} \sum_{k=0}^l \beta_{r,0,2} \cdot \tilde{T}_{r,k} \cdot \tilde{T}_{r,l-k} \cdot u_{r,i-3-l} + \sum_{l=0}^{i-3} \beta_{r,2,2} \cdot \tilde{v}_r \cdot \tilde{T}_{r,l} \cdot u_{r,i-3-l} \right), \\
 \tilde{g}_{r,i} = & \sum_{l=0}^i \alpha_{r,l,0} \cdot \tilde{v}_r^l \cdot c_{r,i-l} + I(i,1) \cdot (d_{r,0}^* \cdot (b_{r,1} \cdot u_{(r,i-1)\varphi\varphi}'' + b_{r,2} \cdot u_{(r,i-1)\psi\psi}'' + \\
 & + b_{r,3} \cdot u_{(r,i-1)\eta\eta}'' + b_{r,4} \cdot u_{(r,i-1)\psi}'' + b_{r,5} \cdot u_{(r,i-1)\eta}'') + \sum_{l=0}^{i-1} \alpha_{r,0,1} \cdot \tilde{T}_{r,l} \cdot c_{r,i-1-l} - \\
 & - \sum_{l=0}^{i-1} \beta_{r,l,0} \cdot \tilde{v}_r^l \cdot u_{r,i-1-l} - \sum_{l=1}^i (\tilde{\sigma}_{r,l} \cdot u'_{(r,i-l)t} + \tilde{\sigma}'_{r,l} \cdot u_{r,i-l}) + I(i,2) \times \\
 & \quad \times \left(\sum_{l=0}^{i-2} \sum_{k=0}^l \alpha_{r,0,2} \cdot \tilde{T}_{r,k} \cdot \tilde{T}_{r,l-k} \cdot c_{r,i-2-l} + \right. \\
 & \quad \left. + \sum_{l=0}^{i-2} \alpha_{r,2,2} \cdot \tilde{v}_r \cdot \tilde{T}_{r,l} \cdot c_{r,i-2-l} - \sum_{l=0}^{i-2} \beta_{r,0,1} \cdot \tilde{T}_{r,l} \cdot u_{r,i-2-l} \right) - \\
 & - I(i,3) \cdot \left(\sum_{l=0}^{i-3} \sum_{k=0}^l \beta_{r,0,2} \cdot \tilde{T}_{r,k} \cdot \tilde{T}_{r,l-k} \cdot u_{r,i-3-l} + \sum_{l=0}^{i-3} \beta_{r,2,2} \cdot \tilde{v}_r \cdot \tilde{T}_{r,l} \cdot u_{r,i-3-l} \right), \\
 \tilde{g}_{r,i} = & I(i,1) \cdot (d_{r,0}^{**} \cdot (b_{r,1} \cdot \tilde{T}_{(r,i-1)\varphi\varphi}'' + b_{r,2} \cdot \tilde{T}_{(r,i-1)\psi\psi}'' + b_{r,3} \cdot \tilde{T}_{(r,i-1)\eta\eta}'' + b_{r,4} \cdot \tilde{T}_{(r,i-1)\psi}'' + \\
 & + b_{r,5} \cdot \tilde{T}_{(r,i-1)\eta}'') + \tilde{\gamma} \cdot \sum_{l=0}^{i-1} \alpha_{r,l,0} \cdot \tilde{v}_r^l \cdot c_{r,i-1-l} - \sum_{l=1}^i (\tilde{\sigma}_{r,l} \cdot \tilde{T}'_{(r,i-l)t} + \tilde{\sigma}'_{r,l} \cdot \tilde{T}'_{(r,i-l)}) + \\
 & + I(i,2) \cdot \tilde{\gamma} \cdot \left(\sum_{l=0}^{i-2} \alpha_{r,0,1} \cdot \tilde{T}_{r,l} \cdot c_{r,i-2-l} - \sum_{l=0}^{i-2} \beta_{r,l,0} \cdot \tilde{v}_r^l \cdot u_{r,i-2-l} \right) + I(i,3) \cdot \tilde{\gamma} \times \\
 & \quad \times \left(\sum_{l=0}^{i-3} \sum_{k=0}^l \alpha_{r,0,2} \cdot \tilde{T}_{r,k} \cdot \tilde{T}_{r,l-k} \cdot c_{r,i-3-l} + \right. \\
 & \quad \left. + \sum_{l=0}^{i-3} \alpha_{r,2,2} \cdot \tilde{v}_r \cdot \tilde{T}_{r,l} \cdot c_{r,i-3-l} - \sum_{l=0}^{i-3} \beta_{r,0,1} \cdot \tilde{T}_{r,l} \cdot u_{r,i-3-l} \right) - \\
 & - I(i,4) \cdot \tilde{\gamma} \cdot \left(\sum_{l=0}^{i-4} \sum_{k=0}^l \beta_{r,0,2} \cdot \tilde{T}_{r,k} \cdot \tilde{T}_{r,l-k} \cdot u_{r,i-4-l} + \sum_{l=0}^{i-4} \beta_{r,2,2} \cdot \tilde{v}_r \cdot \tilde{T}_{r,l} \cdot u_{r,i-4-l} \right),
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{g}_{r,i} &= -I(i,1) \cdot \mu_{r,0} \cdot u_{r,i-1} - I(i,2) \cdot \sum_{l=0}^{i-2} \mu_{r,1} \cdot \tilde{T}_{r,l} \cdot u_{r,i-2-l} - \\ &\quad - I(i,3) \cdot \sum_{l=0}^{i-3} \sum_{k=0}^l \mu_{r,2} \cdot \tilde{T}_{r,k} \cdot \tilde{T}_{r,l-k} \cdot u_{r,i-3-l}, \\ \tilde{g}_{r,i} &= -I(i,1) \cdot \tilde{\lambda}_r \cdot u_{r,i-1}, \\ \tilde{f}_r &= \tilde{f}_r(\varphi, \psi, \eta) = \kappa_r^0 \cdot \int_{\varphi_{*(r-1)}}^{\varphi} \frac{\tilde{\sigma}_r^0(\tilde{\varphi}, \psi, \eta)}{\tilde{v}_r^2(\tilde{\varphi}, \psi, \eta)} d\tilde{\varphi} \end{aligned}$$

час проходження вздовж відповідної лінії течії відповідними частинками домішки шляху від точки

$$(x(\varphi_{*(r-1)}^*, \psi, \eta), y(\varphi_{*(r-1)}^*, \psi, \eta), z(\varphi_{*(r-1)}^*, \psi, \eta)) \in G_z^{r-1}$$

до точки

$$(x(\varphi, \psi, \eta), y(\varphi, \psi, \eta), z(\varphi, \psi, \eta)) \in G_z^r,$$

\tilde{f}_r^{-1} — функція, обернена відповідно до \tilde{f}_r відносно змінної φ ,

$$I(a,b) = \begin{cases} 1, & a \geq b, \\ 0, & a < b. \end{cases}$$

Висновки. Сформовано математичну модель для прогнозування процесу адсорбційної доочистки води від домішок у швидких багатошарових фільтрах конусоподібної форми з кусково-однорідними пористими завантаженнями з урахуванням зміни температури фільтраційного потоку вздовж висоти фільтру при додержанні сталої швидкості фільтрації. За умови, що конвективні складові тепло- і масоперенесення й адсорбція переважають над вкладом дифузії й десорбції, отримано алгоритм числово-асимптотичного наближення розв'язку відповідної нелінійної сингулярно-збуреної крайової задачі для модельної області конусоподібної форми, обмеженої двома еквіпотенціальними поверхнями і поверхнею течії та розділеної деякими заданими еквіпотенціальними поверхнями на кілька підобластей. Запропонована модель аналогічно [20, 21] для заданої сталої швидкості фільтрації дозволяє шляхом проведення комп'ютерних експериментів спрогнозувати не лише зміну характеристик кусково-однорідних пористих завантажень (коефіцієнтів фільтрації й активної пористості), але й визначити оптимальні варіанти використання адсорбентів і збільшення тривалості роботи фільтрів за рахунок вибору їх форми та висоти шарів з урахуванням як зміни швидкості фільтраційного потоку вздовж висоти фільтру, так і температури.

Список використаних джерел:

1. Дваденко М. В. Адсорбционная очистка сточных вод / М. В. Дваденко, Н. М. Привалова, И. Ю. Кудасва, А. Г. Степура // Современные наукоемкие технологии. — 2010. — № 10. — С. 214–215.

2. Корнева Д. А. Адсорбционная очистка — эффективный метод очистки сточных вод и подготовки воды для хозяйственно-питьевого водопользования / Д. А. Корнева, Л. Н. Куров // Успехи современного естествознания. — 2011. — № 7. — С. 129.
3. Орлов В. О. Водоочисні фільтри із зернистою засипкою / В. О. Орлов. — Рівне : НУВГП, 2005. — 163 с.
4. Cheremisinoff N. P. Handbook of water and wastewater treatment technologies / N. P. Cheremisinoff. — Boston : Butterworth-Heinemann, 2002. — 645 p.
5. Edzwald J. Water Quality & Treatment. A Handbook on Drinking Water / J. Edzwald. — McGraw-Hill Professional, 2010. — 1996 p.
6. Hendricks D. W. Fundamentals of water treatment unit processes : physical, chemical, and biological / D. W. Hendricks. — Boca Raton : CRC Press, 2011. — 883 p.
7. Quevauviller Ph. Analytical methods for drinking water: advances in sampling and analysis / Ph. Quevauviller, K. C. Thompson. — John Wiley & Sons Ltd, 2006. — 188 p.
8. Сакалова Г. В. Дослідження ефективності очищення стічних вод від іонів важких металів з використанням природних адсорбентів: монографія / Г. В. Сакалова, Т. М. Василінич. — Вінниця: ТОВ «Твори», 2019. — 92 с.
9. Невзорова А. Б. Основы автоматизации систем водоснабжения и водоотведения : пособие / А. Б. Невзорова. — Гомель: УО «БелГУТ», 2005. — 115 с.
10. Макаревич Н. А. Теоретические основы адсорбции: учебное пособие / Н. А. Макаревич, Н. И. Богданович; Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. — Архангельск: САФУ, 2015. — 362 с.
11. Зеленцов В. И. Влияние температуры на равновесие и кинетику адсорбции фторид-ионов термообработанными оксигидратами Al / В. И. Зеленцов, Т. Я. Дацко, Е. Е. Дворникова // Электронная обработка материалов, 2008, № 3. — С. 50–58.
12. Бомба А. Я. Моделювання нелінійно-збурених процесів очищення рідин від багатоконпонентних забруднень: монографія / А. Я. Бомба, А. П. Сафоник. — Рівне: НУВГП, 2017. — 296 с.
13. Минц Д. М. Теоретические основы технологии очистки воды / Д. М. Минц. — М. : Стройиздат, 1964. — 156 с.
14. Бомба А. Я. Методи теорії збурень прогнозування процесів тепломасопереення в пористих та мікропористих середовищах : монографія / А. Я. Бомба, І. М. Присяжнюк, О. В. Присяжнюк. — Рівне : О. Зень, 2017. — 291 с.
15. Ives K. J. Deep-bed water filters / K. J. Ives // New developments. Filtr. And Sepa. — 1969. — Vol. 6, № 1. — P. 42–48.
16. Kalteh A. M. Review of the self-organizing map (SOM) approach in water resources: analysis, modelling and application / A. M. Kalteh, P. Hjorth and R. Berndtsson // Environmental Modelling and Software. — 2008. — Vol. 23, № 7. — P. 835–845.
17. Maier H. R. Neural networks for the prediction and forecasting of water resources variables: a review of modelling issues and applications / H. R. Maier, G. C. Dandy // Environmental Modelling and Software. 2000. — Vol. 15, № 1. — P. 101–124.
18. Self-organizing maps in the analysis of an industrial wastewater treatment process / M. Heikkinen, H. Poutiainen, M. Liukkonen, T. Heikkinen and

- Y. Hiltunen // *Mathematics and Computers in Simulation*. — 2011. — Vol. 82, № 3. — P. 450–459.
19. Safonyk A. P. Modelling the filtration processes of liquids from multicomponent contamination in the conditions of authentication of mass transfer coefficient / A. P. Safonyk // *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*. — 2015. — Vol. 9. — P. 189–192.
 20. Бомба А. Я. Прогнозування зміни характеристик кусково-однорідних пористих завантажень швидких багатошарових фільтрів / А. Я. Бомба, Ю. С. Климяк // *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. — Харків : НТУ «ХП», 2018. — № 27 (1303). — С. 8–15.
 21. Бомба А. Я. Прогнозування оптимального використання фільтруючих матеріалів у швидких багатошарових фільтрах із кусково-однорідними пористими завантаженнями / А. Я. Бомба, Ю. С. Климяк // *Журнал обчислювальної та прикладної математики : наук. журн. Київ. нац. ун-т ім. Тараса Шевченка*. — Київ: ТВіМС, 2017. — Вип. 1 (124). — С. 3–14.
 22. Klimjuk Ju. Je. Prediction of changes in the characteristics of filter materials in rapid cone-shaped waterpurifying filters / Ju. Je. Klimjuk // *Innovative solutions in modern science*. — No. 8 (27). — Dubai, 2018. — P. 72–84. doi: 10.26886/2414-634X.8(27)2018.5
 23. Бомба А. Я. Математичне моделювання просторових сингулярно-збурених процесів типу фільтрація-конвекція-дифузія: монографія / А. Я. Бомба, Ю. С. Климяк. — Рівне : ТзОВ фірма «Ассоль», 2014. — 273 с.
 24. Рауз Х. Механика жидкости / Х. Рауз. — М. : Стройиздат, 1967. — 390 с.
 25. Klimjuk Ju. Je. Modelling of spatial filtration fields for one class of rapid multilayer filters of cone-shaped form with piecewise-homogeneous porous loads / Ju. Je. Klimjuk // *Proceedings of III International scientific conference «Science: new goals»*. — London : SI Universum, 2017. — P. 4–10.

COMPUTER PREDICTION OF ADSORPTION PURIFICATION OF WATER FROM IMPURITIES IN RAPID MULTILAYER FILTERS OF CONE-SHAPED FORM

In the paper a mathematical model for computer predicting of the process of adsorption purification of water from impurities in rapid multilayer filters while maintaining a constant filtration rate, taking into account the reverse influence of process characteristics (the concentrations of impurities respectively in the filtration flow stream and on the surface of the adsorbent load, the temperature of the filtration flow) on characteristics load (coefficients of filtration, active porosity, adsorption, desorption) is formulated. The corresponding model problem contains the equation of motion of the filtration flow according to Darcy's law, the continuity equation, the equation of mass and heat balance, and the equation to study the change in the characteristics of piecewise-homogeneous porous loads (filtration coefficients and active porosity). Provided that the convective components of heat and mass transfer and adsorption predominate over the contribution of diffusion and desorption, an algorithm for numerically-asymptotic approximation of solution of the corresponding nonlinear singularly perturbed

boundary value problem for a model region of a conical shape, bounded two equipotential surfaces and a surface flow, separated by some given specified of the equipotential surfaces on several subdomains, is developed. The proposed model allows through computer experiments to investigate changes in the characteristics of piecewise homogeneous porous loads (coefficients of filtration and active porosity of filter materials in each layer), to predict the optimal use of adsorbents and increase the duration of operation of filters by selecting their shape and height influence on the process of adsorption purification of water not only changes in the filtration flow rate along the height of the filter, but also the temperature.

Key words: *mathematical model, computer prediction, process of water purification, impurity, adsorption, temperature, piecewise-homogeneous porous load, rapid multilayer filter, cone-shaped form.*

Отримано: 22.08.2019

UDC 621.391

DOI: 10.32626/2308-5916.2019-20.68-78

V. O. Kuzminykh, Ph. D., Associate Professor,

O. V. Koval, Ph. D., Associate Professor,

S. I. Otrokh, D. Sc., Associate Professor

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv

REFINING THE TYPICAL SCENARIOS BY ADDITIONAL FACTORS

The problems in the quality assessment modeling scenarios collecting information flow on an extensive network of the example of the problem of building and further optimization scenarios to analyze the budget process on an extensive network. Shown use structured approach to the ontology as considered most appropriate to the task of presenting the structure as a graph. Moved assessment of the effect of the use of partial information previously obtained by constructing scenarios collecting information flow on the network, described the count, with further refinement information. An formalized description of the hierarchical structure of the system. An example of the structure of the interaction of ontology elements for the problem of budget analysis is presented.

The use of an integrated approach based on finding the shortest path in the graph and model ontology as a graph that realizes the possibility of using algorithms based on traversing vertices in layers of hierarchy.

An approach to building breadth-first search algorithm that significantly reduces the time to find ways of building scenarios collect information on streaming extensive network. Described in