

В. Л. Поляков

## Моделирование процесса водоочистки в загрузке адсорбера

(Представлено членом-корреспондентом НАН Украины А. Я. Олейником)

*Построена функция отбора адсорбата в слое загрузки адсорбера. Сформулирована нестационарная задача адсорбции примеси и получены ее строгое решение для первой стадии, когда концентрация адсорбированного вещества не достигает предельного значения, и приближенное — для второй стадии. Расчетные формулы и уравнения иллюстрируются многочисленными примерами.*

Метод адсорбции является одним из основных способов физико-химической обработки слабokonцентрированных растворов с целью извлечения вредных или полезных примесей [1–3]. В водоочистных технологиях и схемах широко распространен специальный адсорбционный аппарат (адсорбер), в котором непосредственное удаление загрязнения происходит в загрузке из зернистого сильно сорбирующего материала [4, 5]. Чтобы использовать ее значительный поглотительный ресурс в полной мере и тем самым максимально продлить работу адсорбера, необходим рациональный выбор его конструктивных и технологических параметров. Осуществлять такой выбор реально только с помощью надежного инструмента — инженерного метода, в основе которого лежат современные математические модели и их эффективные решения. В прошлом предпринимались многочисленные и не вполне успешные попытки разработать метод расчета адсорбера, на основе одно- (загрузка) и двухуровневых (зерно, загрузка) моделей [6–10]. Серьезность и большое количество допущений, принимавшихся при постановке и в ходе решения задач динамической адсорбции, обесценили полученные таким образом аналитические решения. Практическая же значимость построенных численных решений этих задач оказывается намного меньше. Поэтому наши работы — данная и предыдущая [11] — направлены на разработку простого расчетного метода, который, тем не менее, позволял бы делать достоверный прогноз изменения всех важнейших физико-химических характеристик в адсорбере и, прежде всего, качества фильтрата, а на его базе обосновывать вышеупомянутые параметры. Теоретические исследования действия слоя адсорбента основываются на результатах изучения поглощения растворенного вещества отдельным зерном [11]. Поток адсорбата характеризуется зависимостью

$$i_p(t) = \frac{4}{3}\pi R^3\theta\varphi \left[ C_w(t) - \varphi \int_0^t e^{-\varphi(t-\tau)} C_w(\tau) d\tau \right], \quad (1)$$

где  $R$  — радиус зерна;  $\theta = n_p + \rho_p K_{ad}$ ,  $n_p$ ,  $\rho_p$  — исходная пористость и плотность материала зерна;  $K_{ad}$  — коэффициент адсорбции;  $\varphi = D_e \tilde{\varphi} / (\theta R^2)$ ;  $D_e$  — эффективный коэффициент диффузии,  $\tilde{\varphi} = (1/15 + 1/(3Bi))^{-1}$ ;  $Bi = k_L R / D_e$ ;  $k_L$  — коэффициент массопереноса в пограничной жидкой пленке. При нисходящем или восходящем фильтровании величины  $i_p$ ,

$C_w$  также зависят от вертикальной координаты  $z$  (начало оси на входе в адсорбер). Тогда объемная функция  $I$  поглощения адсорбата в пористом слое выражается через  $i_p$  следующим образом:

$$\begin{aligned} I(C_w(z, t), t) &= \frac{3(1 - n_w)}{\pi R^3} i_p(C_w(z, t), t) = \\ &= \theta \varphi (1 - n_w) \left[ C_w(z, t) - \varphi \int_0^t e^{-\varphi(t-\tau)} C_w(z, \tau) d\tau \right], \end{aligned} \quad (2)$$

где  $n_w$  — исходная пористость загрузки.

При выборе математической модели фильтрования раствора с малым содержанием примеси через слой зернистого адсорбента использовалась система традиционных допущений относительно физико-химических свойств загрузки, характера протекания в них процессов массопереноса и массообмена. Так, принималось, что загрузка — однородная, массоперенос определяется конвективным механизмом, динамика адсорбата в объеме загрузки контролируется процессом его поглощения совокупностью независимо действующих зерен. Тогда базовое интегро-дифференциальное уравнение принимает вид

$$V \frac{\partial C_w}{\partial z} + I(C_w(z, t), t) = 0 \quad (3)$$

и должно решаться при граничном условии

$$z = 0, \quad C_w = C_0, \quad (4)$$

где  $V$  — скорость фильтрования;  $C_0$  — исходная постоянная концентрация адсорбата. Для большей общности задача (3), (4) представляется в безразмерной форме

$$\frac{\partial \bar{C}_w}{\partial \bar{z}} + \lambda \bar{\varphi} \left[ \bar{C}_w(\bar{z}, \bar{t}) - \bar{\varphi} \int_0^{\bar{t}} e^{-\bar{\varphi}(\bar{t}-\tau)} \bar{C}_w(\bar{z}, \tau) d\tau \right] = 0, \quad (5)$$

$$\bar{z} = 0, \quad \bar{C}_w = 1. \quad (6)$$

Здесь  $\bar{C}_w = C_w/C_0$ ,  $\bar{z} = z/L$ ,  $L$  — высота загрузки;  $\lambda = \theta(1 - n_w)/n_w$ ,  $\bar{\varphi} = n_w L D_e \tilde{\varphi} / (V \theta R^2)$ . В рассматриваемой внешней задаче выбрано в качестве временного масштаба длительность нахождения частицы жидкости в пределах загрузки  $T_w = n_0 L / V$ . Кстати, масштабом для времени во внутренней задаче была величина  $T_p = \theta R^2 / D_e$ , которая на порядки превосходит  $T_w$ .

После применения к уравнению (5) и условию (6) преобразования Лапласа получена простая задача относительно изображения  $\bar{C}_{wL}$

$$\frac{d\bar{C}_{wL}}{d\bar{z}} + \frac{\lambda \bar{\varphi} p}{p + \bar{\varphi}} \bar{C}_{wL} = 0; \quad \bar{z} = 0, \quad \bar{C}_{wL} = \frac{1}{p}, \quad (7)$$

из которой следует

$$\bar{C}_{wL}(\bar{z}, p) = \frac{1}{p} \exp \left[ \left( \frac{\bar{\varphi}}{p + \bar{\varphi}} - 1 \right) \lambda \bar{\varphi} \bar{z} \right]. \quad (8)$$

Обращение выражения (8) дает искомую зависимость

$$\bar{C}_w(\bar{z}, \bar{t}) = e^{-\lambda\bar{\varphi}\bar{z}} \left[ e^{-\bar{\varphi}\bar{t}} I_0 \left( 2\bar{\varphi}\sqrt{\lambda\bar{z}\bar{t}} \right) + \bar{\varphi} \int_0^{\bar{t}} e^{-\bar{\varphi}\tau} I_0 \left( 2\bar{\varphi}\sqrt{\lambda\bar{z}\tau} \right) d\tau \right], \quad (9)$$

где  $I_j$  означает модифицированную функцию Бесселя первого рода  $j$ -го порядка. Следовательно, относительная выходная концентрация адсорбата будет изменяться в соответствии с формулой

$$\bar{C}_e(\bar{t}) = \bar{C}_w(1, \bar{t}) = e^{-\lambda\bar{\varphi}} \left[ e^{-\bar{\varphi}\bar{t}} I_0 \left( 2\bar{\varphi}\sqrt{\lambda\bar{t}} \right) + \bar{\varphi} \int_0^{\bar{t}} e^{-\bar{\varphi}\tau} I_0 \left( 2\bar{\varphi}\sqrt{\lambda\tau} \right) d\tau \right]. \quad (10)$$

С ее помощью можно не только отслеживать ухудшение качества фильтрата со временем, но и подбором находить ключевой технологический параметр — длительность фильтроцикла  $t_f$ , исходя из предельно допустимой концентрации примеси в воде  $C_{e*}$  (принимается в соответствии с действующими нормативами). Тогда уравнение относительно  $\bar{t}_f$  будет

$$e^{-\bar{\varphi}\bar{t}_f} I_0 \left( 2\bar{\varphi}\sqrt{\lambda\bar{t}_f} \right) + \bar{\varphi} \int_0^{\bar{t}_f} e^{-\bar{\varphi}\tau} I_0 \left( 2\bar{\varphi}\sqrt{\lambda\tau} \right) d\tau = \bar{C}_{e*} e^{\lambda\bar{\varphi}}. \quad (11)$$

Чтобы определить распределение адсорбированного вещества по высоте загрузки в любой момент времени, т.е. функцию  $S_w(z, t)$ , необходимо решить уравнение баланса адсорбата на произвольном уровне в ней

$$n_w \frac{\partial C_w}{\partial t} + \rho_w \frac{\partial S_w}{\partial t} = I(z, t), \quad (12)$$

где  $\rho_w$  — плотность слоя адсорбента, которая связана с плотностью его материала  $\rho_p$  соотношением  $\rho_w = (1 - n_w)\rho_p$ . Если в уравнении (12) отбросить малое первое слагаемое, то в безразмерной форме оно станет

$$\frac{\partial \bar{S}_w}{\partial \bar{t}} = \lambda\bar{\varphi} \left[ \bar{C}_w(\bar{z}, \bar{t}) - \bar{\varphi} \int_0^{\bar{t}} e^{-\bar{\varphi}(\bar{t}-\tau)} \bar{C}_w(\bar{z}, \tau) d\tau \right], \quad (13)$$

где  $\bar{S}_w = \rho_w S_w / (n_w C_0)$ . Интегрирование (13) в пределах от 0 до  $\bar{t}$  дает

$$\bar{S}_w(\bar{z}, \bar{t}) = \lambda\bar{\varphi} \int_0^{\bar{t}} \bar{C}_w(\bar{z}, \tau) d\tau - \lambda\bar{\varphi}^2 \int_0^{\bar{t}} \int_0^{\tau} e^{-\bar{\varphi}(\tau-\eta)} \bar{C}_w(\bar{z}, \eta) d\eta d\tau. \quad (14)$$

После интегрирования по частям в правой части уравнение (14) приобретает более компактный вид

$$\bar{S}_w(\bar{z}, \bar{t}) = \lambda\bar{\varphi} \int_0^{\bar{t}} e^{\bar{\varphi}\tau} \int_0^{\tau} e^{\bar{\varphi}\eta} \frac{\partial \bar{C}_w}{\partial \eta} d\eta d\tau. \quad (15)$$

Из (9) вытекает, что

$$\frac{\partial \bar{C}_w}{\partial \bar{t}} = \bar{\varphi} \sqrt{\frac{\lambda \bar{z}}{\bar{t}}} e^{-\lambda \bar{\varphi} \bar{z} - \bar{\varphi} \bar{t}} I_1 \left( 2 \bar{\varphi} \sqrt{\lambda \bar{z} \bar{t}} \right). \quad (16)$$

Тогда после преобразований в (15) с учетом (16) окончательное выражение для концентрации  $\bar{S}_w$  будет

$$\bar{S}_w(\bar{z}, \bar{t}) = \lambda \bar{\varphi} e^{-\lambda \bar{\varphi} \bar{z}} \int_0^{\bar{t}} e^{-\bar{\varphi} \tau} I_0 \left( 2 \bar{\varphi} \sqrt{\lambda \bar{z} \tau} \right) d\tau. \quad (17)$$

Важным частным случаем (17) является формула для контроля за накоплением адсорбированного вещества на входе в загрузку

$$\bar{S}_{w0}(\bar{t}) = \bar{S}_w(0, \bar{t}) = \lambda (1 - e^{-\bar{\varphi} \bar{t}}). \quad (18)$$

Следовательно, взаимосвязь между приведенными входной концентрацией  $\bar{S}_{w0}/\lambda$  и временем  $\bar{\varphi} \bar{t}$  носит универсальный характер и может быть описана единственной экспоненциальной кривой. Кстати, во входном сечении обе концентрации внутри зерна ( $C_p, S_p$ ) будут зависеть не только от времени, но и от внутренней координаты — радиуса. В частности, при  $\bar{z} = 0$  на поверхности зерна

$$\bar{C}_{PR0}(\tilde{t}) = \bar{C}_p(0, 1, \tilde{t}) = 1 - \frac{e^{-\tilde{\varphi} \tilde{t}}}{1 + 0,2\text{Bi}},$$

$$\bar{S}_{PR0}(\tilde{t}) = 1 - \frac{e^{-\tilde{\psi} T_w \tilde{t}/T_p}}{1 + 0,2\text{Bi}},$$

где  $\tilde{t} = t/T_p$ . Масштабом для концентрации  $S_p$  служит при линейной изотерме адсорбции [12]

$$S_p = K_{\text{ad}} C_p$$

произведение  $K_{\text{ad}} C_0$ .

Опытным путем установлено, что емкость адсорбента зависит от исходного содержания примеси в воде и с его увеличением будет расти, но только до определенной величины [13, 14]. Иными словами, для  $S_w$  существует предельное значение  $S_{\text{max}}$ , которое не может быть превышено при любом  $C_0$ . Поэтому в некоторых случаях при моделировании действия зерна или слоя адсорбента следует накладывать на рост функций-концентраций  $S_p, S_w$  соответствующие ограничения. Однако при глубокой водоочистке, когда концентрация примеси уже на входе в загрузку небольшая, обычно справедливо соотношение

$$K_{\text{ad}} C_0 \leq S_{\text{max}}$$

и все приведенные выше зависимости могут применяться даже при  $t \rightarrow \infty$ . Если же  $S_{\text{max}}$  оказывается меньше  $K_{\text{ad}} C_0$ , то рассчитывать фильтрование раствора приходится уже в два

этапа. На первом используются исходная модель и вышеизложенная методика (до момента  $t_*$ , когда  $S_w$  во входном сечении достигает  $S_{\max}$ ), а на втором — скорректированная модель, в которой имеет место неизвестная подвижная граница, а именно,

$$\frac{\partial \bar{C}_w}{\partial \bar{z}} + \lambda \bar{\varphi} \left[ \bar{C}_w(\bar{z}, \bar{t}) - \bar{\varphi} \int_{\bar{t}_*}^{\bar{t}} e^{-\bar{\varphi}\tau} \bar{C}_w(\bar{z}, \tau) d\tau \right] = 0, \quad (19)$$

$$\bar{z} = \bar{z}_*(\bar{t}), \quad \bar{C}_w = 1. \quad (20)$$

Для определения же закона перемещения границы зоны предельного насыщения адсорбента привлекаются выражение (17) и условие

$$\bar{z} = \bar{z}_*(\bar{t}), \quad \bar{S}_w = S_{\max}. \quad (21)$$

Относительное время насыщения адсорбента во входном сечении  $\bar{t}_*$  (окончания первого этапа) в рамках принятой модели точно вычисляется по формуле

$$\bar{t}_* = -\frac{1}{\bar{\varphi}} \ln \left( 1 - \frac{\bar{S}_{\max}}{\lambda} \right).$$

Кстати, интегро-дифференциальное уравнение (5) сводится путем замены

$$y(\bar{z}, \bar{t}) = \int_{\bar{t}_*}^{\bar{t}} e^{\bar{\varphi}\tau} \bar{C}_w(\bar{z}, \tau) d\tau$$

к дифференциальному уравнению в частных производных второго порядка.

Получить аналитическое решение задачи (19)–(21), тем более простое по форме, не удастся. Поэтому предлагается упрощенная процедура учета ограниченности адсорбционного ресурса загрузки. И, прежде всего, на расчетный момент времени  $t_1$  ( $t_1 > t_*$ ) с помощью (17) вычисляется координата границы зоны насыщения  $\bar{z}_{*1} = \bar{z}_*(\bar{t}_1)$ . Затем находится относительный излишек адсорбированного вещества, присутствующий, согласно (17), в верхней части загрузки, по формуле

$$\Delta \bar{S}(t_1) = \lambda \bar{\varphi} \int_0^{\bar{z}_{*1}} e^{-\lambda \bar{\varphi} z} \int_0^{\bar{t}_1} e^{-\bar{\varphi}(t_1 - \tau)} I_0(2\bar{\varphi} \sqrt{\lambda z \tau}) d\tau d\bar{z} - \bar{z}_{*1} S_{\max}.$$

Далее, принимая во внимание подобие кривых  $\bar{S}_w(\bar{z})$  на разные моменты времени, он определяется в нижележащей части слоя адсорбента так, чтобы новообразованный профиль концентрации связанного адсорбата на участке  $[\bar{z}_{*2}, 1]$  совпал с аналогичным профилем, рассчитанным здесь по (17) на момент  $\bar{t}_2$  ( $\bar{z}_{*2} = \bar{z}_*(\bar{t}_2)$ ). Таким образом, на момент  $\bar{t}_1$  уточненный профиль  $\bar{S}_w(\bar{z})$  будет уже состоять из двух фрагментов — в пределах зоны насыщения  $\bar{S}_w = \bar{S}_{\max}$ , а при  $\bar{z} > \bar{z}_{*1}$  — часть профиля, отвечающая моменту  $\bar{t}_2$ , который наряду с  $\bar{z}_{*2}$  находится из соображений баланса адсорбированного вещества путем решения

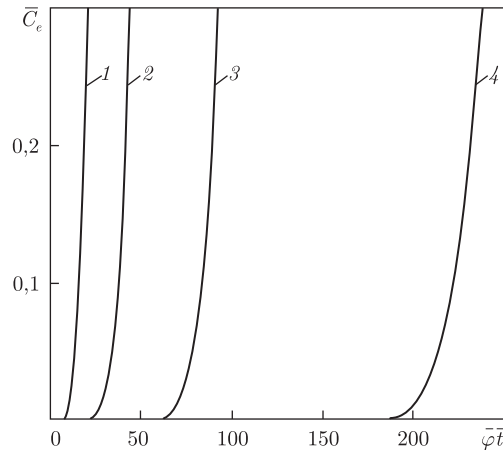


Рис. 1. Графики зависимости  $\bar{C}_e(\bar{\varphi}\bar{t})$ : 1 —  $\lambda\bar{\varphi} = 25$ ; 2 —  $\lambda\bar{\varphi} = 50$ ; 3 —  $\lambda\bar{\varphi} = 100$ ; 4 —  $\lambda\bar{\varphi} = 250$

СИСТЕМЫ

$$\lambda\bar{\varphi}e^{-\lambda\bar{\varphi}\bar{z}_{*2}} \int_0^{\bar{t}_2} e^{-\bar{\varphi}\tau} I_0\left(2\bar{\varphi}\sqrt{\lambda\bar{z}_{*2}\tau}\right) d\tau = \bar{S}_{\max},$$

$$\bar{z}_{*2}\bar{S}_{\max} + \int_{\bar{z}_{*2}}^1 \bar{S}_w(\bar{z}, t_2) d\bar{z} = \Delta\bar{S} + \bar{z}_{*1}\bar{S}_{\max} + \int_{\bar{z}_{*1}}^1 \bar{S}_w(\bar{z}, t_1) d\bar{z}.$$

И наконец, возросшее в связи с прекращением адсорбции в слое  $[0, \bar{z}_{*1}]$  выходное значение  $\bar{C}_e(\bar{t})$  следует определять по формуле (10), принимая в ней  $\bar{t} = \bar{t}_2$ .

Фактически при двухэтапных расчетах фильтрования адсорбата используется кусочно-линейная форма изотермы адсорбции, связывающая обе равновесные концентрации  $C_{eq}$ ,  $S_{eq}$  следующим образом:

$$S_{eq} = K_{ad}C_{eq} \quad \text{при} \quad C_{eq} \leq \frac{S_{\max}}{K_{ad}}; \quad S_{eq} = S_{\max} \quad \text{при} \quad C_{eq} > \frac{S_{\max}}{K_{ad}}.$$

Применение предложенных выше формул и уравнений в практике расчетов удаления примесей из доочищаемых природных и сточных вод методом адсорбции иллюстрируется на многочисленных примерах с характерными исходными данными. Значения введенных комплексного параметра  $\lambda\bar{\varphi}$ , являющегося комбинацией из шести модельных параметров, и приведенного времени  $\bar{\varphi}\bar{t}$  или фиксировались, или варьировались в широких пределах. Предметом вычислений стали относительные величины — концентрации растворенного и адсорбированного вещества, а также время защитного действия загрузки. Прежде всего, определялась динамика выходной концентрации  $\bar{C}_e$  при разных значениях  $\lambda\bar{\varphi}$ . Кривые  $\bar{C}_e(\bar{\varphi}\bar{t})$ , приведенные на рис. 1, показывают, что слой адсорбента способен обеспечивать высокое качество водоочистки в течение длительного периода (намного дольше, чем при фильтровании слабokonцентрированных суспензий). Вместе с тем, в заключительной фазе работы адсорбера, когда его защитная способность практически исчерпана, наблюдается резкий рост  $\bar{C}_e$ . И здесь особенно важно своевременно прекратить фильтрование и начать регенерацию загрузки.

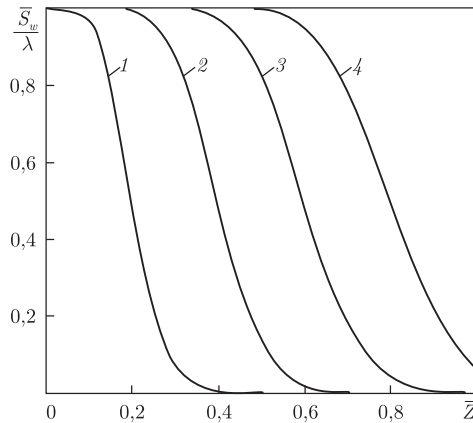


Рис. 2. Профили приведенной концентрации адсорбированного вещества: 1 –  $\bar{\varphi}t = 20$ ; 2 –  $\bar{\varphi}t = 40$ ; 3 –  $\bar{\varphi}t = 60$ ; 4 –  $\bar{\varphi}t = 80$

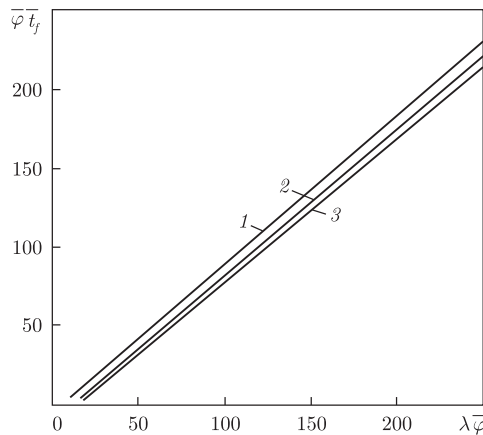


Рис. 3. Графики зависимости  $\bar{\varphi}t_f(\lambda\bar{\varphi})$ : 1 –  $\bar{C}_{e*} = 0,2$ ; 2 –  $\bar{C}_{e*} = 0,1$ ; 3 –  $\bar{C}_{e*} = 0,05$

При поглощении примесей современными адсорбентами ресурс последних расходуется весьма рационально. Об этом, наряду с рис. 1, свидетельствует и рис. 2, на котором представлены профили  $\bar{S}_w(\bar{z})$ , отнесенные к  $\lambda$ , на разные моменты времени  $\bar{\varphi}t$ . Первое время активно сорбирует вещество из раствора тонкий верхний слой, а нижний практически не участвует в этом процессе. Затем постепенно в очистку включаются нижние слои, а верхние, наоборот, насыщаются адсорбентом и играют в ней уже пассивную роль. Значимый вынос примеси из загрузки начинается только после заполнения большей части ее адсорбционной емкости. Насыщение же остаточной емкости существенно замедляется вследствие усиливающегося выноса.

Длительность рабочего периода адсорбера (фильтрацикла)  $t_f$  будет максимальной, если фильтрование воды при глубокой очистке прекращается в момент достижения выходной концентрации адсорбата  $C_e$  предельно допустимого значения  $C_{e*}$ . Связь  $\bar{\varphi}t_f$  с микро- и макропараметрами задачи динамической адсорбции устанавливает уравнение (11). Результаты расчета технологической функции  $\bar{\varphi}t_f(\lambda\bar{\varphi})$  при изменении аргумента более чем на порядок представлены на рис. 3. Требования, предъявляемые к качеству фильтрата, в разных примерах заметно отличались. Построенные кривые наглядно демонстрируют значительный

очистной потенциал адсорберов при разнообразных физико-химических условиях. Взаимная близость отмеченных кривых указывает на большое значение долгосрочного прогноза адсорбционного процесса в слое адсорбента. Преждевременная остановка фильтрования ведет к неполному использованию вышеупомянутой емкости. Необоснованное же продление работы адсорбера обуславливает резкое ухудшение показателей качества воды.

Таким образом, метод инженерного расчета динамической адсорбции, который опирается на данные теоретического анализа действия отдельного зерна адсорбента, является надежным инструментом для определения адсорбционных характеристик, рационального выбора технологических и конструктивных параметров адсорберов.

1. *Запольський А. К., Мішкова-Клименко Н. А., Астрелін І. М. та ін.* Фізико-хімічні основи технології очищення стічних вод: Підручник. – Київ: Лібра, 2000. – 552 с.
2. *Когановский А. М.* Адсорбция и ионный обмен в процессах водоподготовки и очистки сточных вод. – Киев: Наук. думка, 1983. – 236 с.
3. *Bayer P., Heuer E., Karl U., Finkel M.* Economical and ecological comparison of granular activated carbon (GAC) adsorber refill strategies // *Water Res.* – 2005. – **39**. – P. 1719–1728.
4. *Гироль Н. Н., Журба М. Г., Семчук Г. М., Якимчук Б. Н.* Доочистка сточных вод на зернистых фильтрах. – Киев: СП ООО “Типография” Левобережная, 1998. – 92 с.
5. *Кульський А. А.* Основы химии и технологии воды. – Киев: Наук. думка, 1991. – 568 с.
6. *Hand D. W., Grittenden J. C., Thacker W. E.* Simplified models for design of fixed-bed adsorption systems // *J. Environ. Eng. ASCE* – 1984. – **110(2)**. – P. 440–456.
7. *Otero M., Zabkova M., Rodrigues A. E.* Phenolic wastewaters purification by thermal parametric pumping modeling and pilot-scale experiments // *Water Res.* – 2005. – **39**. – P. 3467–3478.
8. *Sabio E., Zamora F., Ganan J. et al.* Adsorption of *p*-nitrophenol on activated carbon fixed-bed // *Ibid.* – 2006. – **40**. – P. 3053–3060.
9. *Simon W., Reinhert P., Hinz C.* Properties of exact and approximate traveling wave solutions for transport with nonlinear and nonequilibrium sorption // *Water Resour. Res.* – 1997. – **33**. – P. 1139–1147.
10. *Sperllich A., Schimelpfenning S., Baumgarten B. et al.* Predicting anion breakthrough in granular ferric hydroxide (GFH) adsorption filters // *Water Res.* – 2008. – **42**. – P. 2073–2082.
11. *Поляков В. Л.* Теоретический анализ действия зерна адсорбента // *Доп. НАН України.* – 2012. – № 4. – С. 64–70.
12. *Losphesri O., Intravijit J., Sabatini D. A.* Sorption of acetaminophen, ethynyl estradiol, nalidixic acid and norfloxacin to silica, alumina and a hydrophobic medium // *Water Res.* – 2006. – **40**. – P. 1481–1491.
13. *Meshko V., Markovska L., Mincheva M., Rodrigues A. E.* Adsorption of basic dyes on granular activated carbon and natural zeolite // *Ibid.* – 2001. – **35**. – P. 3357–3360.
14. *Sotelo J. L., Ovejero G., Delgado J. A., Martinez J.* Comparison of adsorption equilibrium and kinetics of four chlorinated organics from water onto GAC // *Ibid.* – 2002. – **36**. – P. 599–608.

*Институт гидромеханики НАН Украины, Киев*

*Поступило в редакцию 31.05.2011*

**В. Л. Поляков**

## **Моделювання процесу водоочищення в завантаженні адсорбера**

*Побудовано функцію відбору адсорбату у шарі завантаження адсорбера. Сформульовано нестационарну задачу адсорбції домішок і одержано її строгий розв'язок для першої стадії, коли концентрація адсорбованої речовини не досягає граничного значення, і наближений — для другої стадії. Розрахункові формули і рівняння ілюструються численними прикладами.*



**V. L. Polyakov**

### **Simulation of wastewater purification in the adsorber filter medium**

*A function of the adsorbate uptake within the adsorber porous layer has been found. A non-steady task of the adsorption of impurities has been stated, and its exact solution for the first stage (immobilized substance concentration wasn't reach the ultimate value) and the approximate one for the second stage have been obtained. The calculated formulae and equations have been illustrated by numerous examples.*