

CADASTRU, ORGANIZAREA TERITORIULUI ȘI INGINERIA MEDIULUI

УДК 512.312

МЕТОДОЛОГИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЭКОСИСТЕМЫ ОТ ИСТОЧНИКОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Н. РАВШАНОВ, Б. СЕРИКБАЕВ, Э. СЕРИКБАЕВА

Институт математики и информационных технологий АН РУз, Узбекистан;

Ташкентский институт ирригации и мелиорации, Узбекистан

Abstract: In order to analyze the functioning of the technological process of filtering with suspension, an adequate mathematical model and numeric algorithm were worked out and a computational experiment on PC was carried out. The results of computational experiments are given in the form of graphs.

Key words: Computational experiment, Ecology, Filtering, Groundwater, Mathematical model, Technological process.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мировом масштабе возникают угрозы экологической безопасности, в частности, проблемы нехватки и загрязнения водных ресурсов, обеспеченность населения питьевой водой, загрязнение подземных вод от источников загрязнения, радиационное загрязнение отдельных территорий и т.д.

Для защиты сточных и подземных вод от источников загрязнения – промышленных объектов - необходимо разработать эффективные методы и средства на основе проведенного комплексного исследования процесса в целом.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Для очистки и фильтрования сточных, выбросных вод, промышленных растворов в технологических циклах используются фильтры с ионитными фильтровальными перегородками. Обычно выбросные воды в своих составах наряду с ионными примесями содержат гель-частицы различных размерностей и свойств. При процессе фильтрования многокомпонентных растворов, во-первых, частицы, находящиеся в них, коагулируются в порах фильтра, что приводит к их набуханию, в результате чего его пропускная способность уменьшается и изменяется пропускная способность активной части фильтра; во-вторых, оседая на поверхности фильтра, образуется слой осадка, в результате чего изменяются законы протекания технологического процесса (ТП), давление внутри фильтра постепенно растет, за счет чего происходит переупаковка слоев осадка и его сжатие; в-третьих, происходит неправильное переключение фильтровальных агрегатов; в-четвертых, жидкий раствор, подвергающийся фильтрации, полностью не очищается от нежелательных ионов и, попадая в окружающую среду, ухудшает экологическое состояние рассматриваемого региона в целом.

Поэтому, для достижения максимально лучшего результата по очистке конечного продукта от нежелательных примесей в процессе фильтрования, последний должен быть организован как технологический цикл с оптимальными параметрами, включающие характеристики самого фильтра и режима его работы. Поскольку процесс фильтрации, особенно сильно загрязненных жидких ионизированных растворов, представляет собой сложный нестационарный процесс, зависящий от многих факторов, то оптимизация управления процессом фильтрации представляет собой весьма серьезную задачу.

Один из методов решения указанной задачи, рассмотренный в настоящей работе, основан на реализации вычислительного эксперимента в целях исследования параметров процесса фильтрования суспензии. Данный метод использует идеологию «модель – алгоритм – программа».

Общее уравнение задачи. Рассмотрим общее нелинейное дифференциальное (интегро-дифференциальное) уравнение вида

$$L\Theta = F[t, X, u, f(t, x, \Theta, \Theta_r)], \quad (1)$$

где L - дифференциальный оператор; F – произвольная функция параметров $t, X, \Theta, f; f(t, X, \Theta, \Theta_r)$ – нелинейная функция переменной Θ , которая включает производные и/или интегралы от Θ , или некоторая функция ее граничных значений Θ_r ; $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ – вектор координат. Интегральные операторы присутствуют только в правой части уравнения (1). Функция $f(t, X, \Theta, \Theta_r)$ также может присутствовать в одном из граничных условий задачи. Решение уравнения (1) сопряжено с рядом трудностей в связи с нелинейной зависимостью F от Θ . Уравнения такого типа с заданными краевыми условиями типичны для задач физико-химической гидродинамики. Имеются методы решения общего уравнения (1), основанные на аналитических или приближенных решениях с высокой точностью в постановке линейной задачи (при постоянном значении параметра) на основе интерполяционных процедур (Yu. Polyakov, 2006). В этом случае функция $f(t, X, \Theta, \Theta_r)$ заменяется постоянным значением бфс на основе осреднения $f(t, X, \Theta, \Theta_r)$ в некоторой области t и X . Тогда, (1) упрощается и принимает вид

$$L\Theta = F[t, X, u, f(t, x, \text{бфс})]. \quad (2)$$

В случае, когда одно из граничных условий зависит от указанной функции, то и здесь она заменяется на $\langle f \rangle$ и вычисляется в момент времени t на границе Ω на основе решения интегрального уравнения

$$\langle f \rangle = \frac{1}{t\Omega} \int_0^t \int_{\Omega} f(\tau, X, \Theta[\tau, X, \langle f \rangle]) d\Omega d\tau, \quad (3)$$

с помощью итеративного алгоритма:

$$\langle f \rangle^{(i+1)} = \frac{1}{t\Omega} \int_0^t \int_{\Omega} f(\tau, X, \Theta[\tau, X, \langle f \rangle^i]) d\Omega d\tau. \quad (3a)$$

Физическая интерпретация (3), (3a) состоит в том, что приближенная кривая, рассчитанная на основе функции Q из выражения (2), максимально приближается к численным решениям для f на конце интервала осреднения.

Задача анализа технологического процесса фильтрования суспензии. Множество параметров, входящих в уравнения (1), (2), отличаются своими удельными весами. При этом, в математической постановке возникает, своего рода, некорректная задача: малые отклонения параметров приводят к сильному изменению искомой функции, т.е. к качественным и количественным изменениям процесса в целом. Такое поведение функции и его следствия наиболее целесообразно исследовать на основе реализации вычислительного эксперимента.

Представление модели стационарного технологического процесса фильтрования сильнозагрязненных ионизированных жидких растворов на основании (1) запишется в виде системы дифференциальных уравнений в безразмерных координатах, включающих закон сохранения массы, количества движения, кинетику процесса (Н. Равшанов, Г. Шерматова, 2006; Н. Равшанов, Д. Шарипов, А. Ходжабаев и др., 2006; Н. Равшанов, Г. Шерматова, 2008):

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \text{Re} w \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{w}{1 - \Theta_3} \frac{d\Theta_3}{dt} = -Eu \cdot \text{Re} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{HK_0}{H_0^3} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{w}{(1 - \Theta_3)(1 - \delta)^2}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{1}{Eu} \left[\frac{m}{\text{Re}(1 - \delta)^2} - \frac{d\Theta_3}{dt} \right]; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = -\frac{\partial(\Theta w)}{\partial x} - \frac{\partial \alpha}{\partial t} - (1 - m_0) \frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{\mu_0 \alpha_\tau}{H_0^2} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2}; \quad (6)$$

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} = \lambda(\Theta - \gamma\delta); \quad \Theta - \Theta_3 = \frac{\alpha}{1 - \delta}; \quad (7)$$

$$\frac{d\Theta_3}{dt} = \frac{1-\bar{\Theta}}{2-\delta} \frac{d\bar{\Theta}}{dt} + \frac{1}{1-\delta} \left[(1-\bar{\Theta}) \frac{d\bar{\delta}}{dt} - \frac{\Theta_1 w_0}{mH_0(1-\delta_1)} \right] + \Theta_3 \left[\frac{d\bar{\delta}}{dt} + \frac{w_0}{mH_0(1-\delta_1)} \right] \frac{1}{2-\delta}; \quad (8)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = Sw; \quad (9)$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = -\frac{w_0 \alpha_\tau}{H_0 m} \frac{\partial n_i}{\partial x} - \frac{N_0}{n_i m} + \frac{\partial N_i}{\partial t} + \frac{D_a \alpha_\tau}{H^2 m} \frac{\partial^2 n_i}{\partial x^2} + \frac{\alpha_\tau D_b}{PH_0} \frac{\partial P}{\partial x}; \quad (10)$$

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = \frac{\alpha_\tau \beta}{1} \left[\frac{n_0 n_i}{N_0} - \frac{a}{a - b N_i N_0} \right], \quad (11)$$

с начальными условиями

$$\left. \begin{aligned} \Theta &= e^{-\lambda H_0 B x}; \quad \Theta_3 = 0; \\ \delta &= 0; \quad w = 0; \\ n_1 &= 0; \quad n_2 = \varphi_2; \\ N_2 &= 1; \quad N_1 = \varphi_3 \end{aligned} \right\} \text{при } t = 0, \quad (12)$$

и граничными условиями

$$\left. \begin{aligned} \Theta &= 1; \quad P = 1; \\ n_1 &= 1/n_0; \quad n_2 = 0; \\ w &= 1; \end{aligned} \right\} \text{при } x = 0; \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} \Theta(x, t) &= \Theta_0 e^{-\lambda B H_0} \left[e^{-\lambda B t} I_0(2\sqrt{\lambda^2 \gamma H_0 t}) + \frac{1}{\lambda B H_0} \int_0^{\lambda^2 B H_0 \gamma t} e^{-\sqrt{\lambda B H_0} \tau} I_0(2\sqrt{\tau}) d\tau \right]; \\ \frac{\partial n_1}{\partial x} &= 0, \quad \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{a_0 H_0}{w_0}; \quad n_2 = \frac{n_0}{N_0} \end{aligned} \right\} \text{при } x = 1, \quad (14)$$

где

$$\bar{\Theta}(t) = \int_0^1 \Theta(x, t) dx, \quad \bar{\delta}(t) = \int_0^1 \delta(x, t) dx; \quad B = \frac{m_0(1-m)}{w}, \quad Eu = \frac{\rho w^2}{P_0 m} - \text{число Эйлера}; \quad Re = \frac{\rho k_0 w}{\mu H_0} -$$

число Рейнольдса.

В (14) I_0 - функция Бесселя нулевого порядка. Далее, N_i и n_i - неравновесные концентрации обменивающихся ионов в растворе и сорбенте; P - перепад давления, Θ - концентрация взвеси, оседающая на поверхности фильтра, Θ_1 - исходная концентрация взвеси в суспензии, Θ - концентрация частиц, протекающая через фильтровальную перегородку, Θ_3 - концентрация взвеси, оседающая в порах фильтра, m - пористость осевшей массы в порах фильтра, m_0 - начальная пористость, H_0 - толщина фильтра; ρ, μ - вязкость и плотность фильтрата; λ - кинематический коэффициент; γ - параметр фильтрования; w - скорость фильтрования; β - эффективная константа обменивающихся ионов; a, b - постоянные изотеры; D_a, D_b - коэффициенты продольной диффузии и бородиффузии; m_0 - коэффициент искусственной вязкости v - объем фильтрата, проходящего через фильтровальную колонку; S - площадь фильтра.

Для замыкания системы (4) - (14) добавляются уравнения эквивалентности обмена:

$$n_1 + n_2 = n_0; \quad N_1 + N_2 = N_0, \quad (15)$$

где n_0 - исходная концентрация в растворе вводимого в колонку иона, N_0 - обменная емкость поглощения сорбента.

Решение системы (4)-(15) выполнялось с применением векторно-разностной схемы с точностью $O(Dt+Dh^2)$ (А. Самарский, В. Фрязинов, 1980). Шаг интегрирования по времени

брался неравномерным, что позволило значительно сократить объем вычислений и, как следствие, уменьшить ошибки округления. Для нелинейных членов применялся метод квазилинеаризации Беллмана и др. (1968).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для исследования и анализа данного процесса на основе разработанного алгоритма составлен программный комплекс, реализующий вычислительный эксперимент. Численные расчеты выполнялись по данным распределения концентрации солей при обесоливания воды промышленной установкой химического цеха комплексной очистки ТашГРЭС для H -катионирования первой ступени очистки воды от ионов кальция, магния и натрия.

Результаты численного эксперимента приведены на рис. 1-2.

Из рис. 1(а) видно, что на рассматриваемом периоде времени с ростом коэффициента сжимаемости фильтра скорость осаждения гель - частиц в поровом пространстве параболически растет с выпуклостью вниз. Концентрация внутри колонки изменяется аналогично, но с выпуклостью вверх (рис. 1б). Наглядно изменение концентрации со временем, как функции скорости осаждения гель - частиц можно видеть на рис. 1 в виде построенной поверхности. Такое изменение концентрации приводит к тому, что основная масса гель - частиц оседает на верхнем слое фильтра и со временем гель - частицы осаждаются по толщине слоя фильтра. Очевидно, концентрация взвеси в верхних слоях фильтра со временем увеличивается. В связи с закупориванием пор фильтра гель - частицами скорость фильтрации уменьшается (рис. 2а), создавая дополнительное давление внутри колонки агрегата.

С образованием слоя осадка над поверхностью фильтра скорость осаждения и проникновения гель - частиц внутри фильтровальной перегородки уменьшается. Процесс насыщения пор фильтра взвешенными частицами, с достаточной для практики точностью, можно принять выполняющимся по линейному закону.

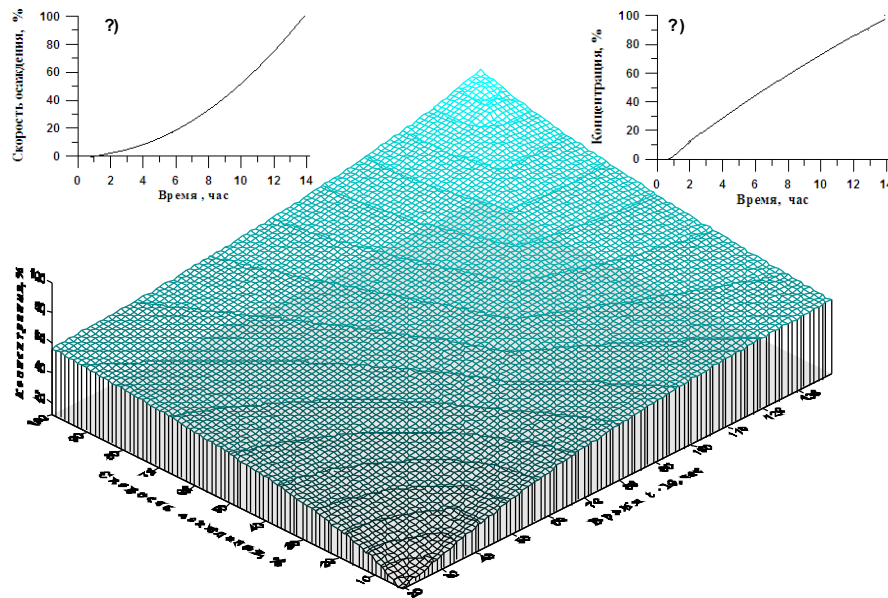


Рис. 1. Поверхность изменения концентрации (%) внутри фильтра, как функция времени (час) и скорости осаждения (%) гель-частиц:

а) – скорость осаждения (%) и б) – изменение концентрации (%), как функции времени (час). На графике поверхности ось времени умножена на 10.

На рисунке 2б приведены изменения обменивающихся ионов в растворе. Как видно из кривых рисунка 2б концентрация обменивающихся ионов в растворе экспоненциально уменьшается. За счет уменьшения их концентрации в растворе увеличивается концентрация обменивающихся ионов в сорбенте.

Изменение объема фильтрата, проходящего через фильтровальную колонку агрегата, показано на рис. 2в. Согласно выполненному численному эксперименту со временем объем фильтрата параболически растет с незначительной кривизной вверх. На начальных стадиях процесса фильтрации скорость прохода раствора через колонки фильтра больше, чем в конечной стадии процесса.

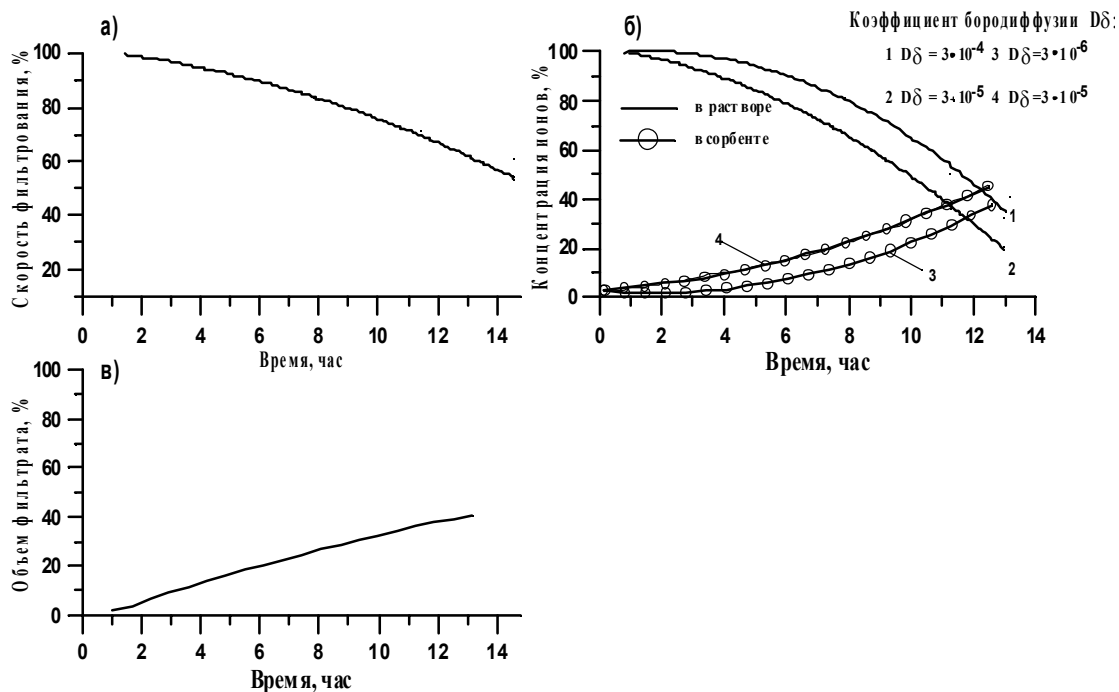


Рис. 2. Изменение объема фильтрата

а) - изменение скорости фильтрации; б) – динамика концентрации ионов в растворе и в сорбенте; в) – динамика объема фильтрата на выходе.

ВЫВОДЫ

Из проведенного численного эксперимента следует, что в результате кольматации взвешенных частицы в порах ионитного фильтра снижаются скорость ионного обмена и время продолжительности работы фильтра. Теоретическое (расчетное) время переключения при отсутствии концентрации взвеси в воде равно 16,6 час, при добавлении концентрации $\Theta = 0,0001$, время переключения равно 13,7 час, при концентрации $\Theta = 0,0003$ - 15,1 час. При наличии концентраций среднее расчетное время переключения составляет 16,2 час.

Расчеты, выполненные для распределения концентрации солей лимонной кислоты, со временем показали, что теоретическое время проскока без концентрации взвеси равно 1 мин., с добавлением концентрации взвеси $\Theta = 0,0001$ - 17 мин., а практическое время проскока - 25 мин.

Теоретическое и экспериментальное время насыщения без концентрации взвеси равно 110 мин, а с концентрацией взвеси – 93 мин. Нужно отметить, что при решении задачи массообмена с кольматацией за указанное время адсорбционный процесс прекратился, однако, концентрация ионита насыщена не полностью. Этот эффект объясняется тем, что гель-частицы, кольматируя ионитный фильтр, как бы «изолируют» зерна ионита и, тем самым, представляют контакт с жидкой фазой.

Эксперимент показал, что при фильтрации фильтрата с помощью многослойного фильтра растет степень очистки растворов от примесей, а время эксплуатации фильтра увеличивалось в 1,2 – 1,3 раза.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Равшанов, Н., Шерматова, Г. У. Вычислительный эксперимент для анализа и исследования нестационарного технологического процесса фильтрования ионизированных жидких растворов // Технические и естественные науки. – Москва, №6, 2006, С. 192-196.
2. Равшанов, Н., Шарипов, Д., Ходжабаев, А. А. и др. Компьютерная модель технологических процессов сепарирования многокомпонентных смесей // Технические и естественные науки. Москва, N 6, 2006, С. 245-248.
3. Равшанов, Н., Шерматова, Г. У. Исследование сложных технологических процессов фильтрования многокомпонентных суспензий и управление ими // Химическая технология. Контроль и управление. Ташкент, №6, 2008, С. 41-47.
4. Самарский, А. А., Фрязинов, В. И. Успехи математических наук. М.: Наука, 1980, 78с.
5. Беллман, Р., Калаба, Р. Квазилинеаризации и нелинейные краевые задачи. М.: Мир, 1968, 154 с.
6. Polyakov, Yu. S. Hollow fiber membrane adsorber: Mathematical model // J. Membr. Sci., V. 280, 2006, PP. 610-623.

Data prezentării articolului – **20.12.2009**