



УДК 541.1+628.16

Математическое моделирование и расчет процесса деминерализации воды в промышленном фильтре

Сообщение 1. Гидродинамика регенерации и отмывки промышленного фильтра

Комарова И.В., Галкина Н.К., Прудковский А.Г., Хамизов Р.Х.

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва

Поступила в редакцию 25.12.2016 г.

Изучены технологические особенности работы промышленной ионообменной колонны на примере катионитового фильтра первой ступени центральной обессоливающей установки Новочеркасской ГРЭС. Описана подготовка фильтра к экспериментам и методика их проведения. Экспериментально изучена гидродинамика процессов регенерации и отмывки. Разработаны модель и программа для описания процессов на этих технологических стадиях. Сопоставлением расчетов и экспериментальных данных показано, что гидродинамика этих процессов описывается диффузионной моделью с коэффициентами, определенными нами ранее при стендовых испытаниях.

Ключевые слова: Математическая модель, расчет, промышленный фильтр, методика эксперимента, гидродинамика, регенерация, отмывка.

Mathematical simulation and calculation of the process of water demineralization in industrial filter

Part 1. Hydrodynamics of regeneration and washing of industrial filter

Komarova I.V., Galkina N.K., Prudkovskii A.G., Khamizov R.Kh.

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of Russian Academy of Sciences (GEOKHI RAS). Moscow

The purpose of this work was to study technological features of the operation of industrial ion - exchanging column, which were investigated by the example of the cationic first stage filter of the Novocherkassk Power Plant central desalting unit.

The methodology of operation was that the filter has been specially prepared for the experiments, namely, special branch pipes were embedded for solution at different points of the filter: at the inlet into the resin bed, at the middle and the outlet point. The choice of monitoring points was done in line with the objectives of the experiment. The composition of initial water to be processed or the water taken for washing, as well as the initial concentration of components in the solutions for regeneration, was measured at the input into the filter. Comparison of component concentrations at the inlet point and the middle of the bed was required in the hydrodynamic studies of regeneration and washing.

The experimental procedure consisted of passing the solution of sulfuric acid, prepared with the partially demineralized water through the filter and subsequent washing of the filter from the acid with partially desalinated water. Break-through curves of sulfuric acid were obtained at the inlet, middle and outlet points defined above. Calculation of the dynamic curves of concentration histories for filling the filter with sulfuric acid and its subsequent washing was carried out by the use of the computation program "Createscheme", description and algorithm of which is given in the theoretical part of this article.

As a result, comparison of the calculated and experimental data shows that the hydrodynamics of studied processes is described with the diffusion model and with the coefficients found earlier in bench-scale tests.

Keywords: mathematical model, calculation, industrial filter, experiments method, hydrodynamics, regeneration, washing

Введение

В ГЕОХИ РАН в течение многих лет проводится работа по моделированию и оптимизации ионообменных процессов в водоподготовке. Доказана адекватность разработанных математических моделей реальному процессу, созданы программы, проведен расчет режимов работы отдельных фильтров и технологических схем для установок различной производительности [1-4]. Первые промышленные испытания, связанные с изучением скоростей движения фронта сорбции натрия, были выполнены нами на промышленном катионитовом фильтре, заполненном сульфоуглем, в результате которых было показано, что гидродинамика потока при очистке воды описывается математической моделью идеального вытеснения, а необходимые для расчета константы обмена и кинетические коэффициенты, определенные в лабораторных условиях и проверенные на укрупненных установках, могут быть использованы при расчете стадии очистки воды в промышленных фильтрах [5].

Дальнейшие исследования были направлены на изучение и математическое описание технологических особенностей работы промышленных фильтров, результаты которых представлены авторами в четырех сообщениях. В первом сообщении рассмотрена гидродинамика регенерации и отмывки, во втором сообщении показано влияние изменения состава очищаемой воды и производительности фильтра на результат очистки воды, в третьем сообщении рассмотрено влияние взрыхления слоя катионита на качество и количество получаемой воды, в четвертом сообщении изложены результаты расчета циклического процесса сорбции, взрыхления, регенерации и отмывки в промышленном фильтре.

С целью углубленного изучения технологических особенностей промышленных фильтров исследования гидродинамики потока при регенерации и отмывке ионитов были проведены на автоматизированном стенде АСНИ-ГЕОХИ. Показано, что гидродинамика описывается диффузионной моделью с двумя коэффициентами: коэффициентом продольной диффузии и порозностью слоя [6]. Эти коэффициенты определялись методом решения обратных задач для разных сорбентов и для колонн без сорбента. В итоге эти коэффициенты вошли в созданный банк коэффициентов [7].

Промышленный эксперимент проведен нами на катионитовом фильтре первой ступени центральной обессоливающей установки Новочеркасской ГРЭС совместно с сотрудниками химической службы РостовЭнерго и химического цеха НГРЭС.

В настоящем сообщении изложена подготовка промышленного фильтра к экспериментам, методика экспериментов, оборудование фильтра, рассмотрена гидродинамика стадии регенерации и отмывки в слое катионита. С использованием программы «Createscheme», созданной для расчета процессов водоподготовки для энергетики, изучено влияние на эти стадии изменения концентрации раствора в пространстве над слоем ионита в промышленном фильтре при его регенерации и отмывке.

Теоретическая часть

Алгоритм моделирования процессов сорбции. Все особенности промышленного процесса в настоящее время реализованы в программе “Createscheme” [8], кото-

рая позволяет проводить расчёты технологических циклов, состоящих из стадий сорбции, взрыхления, регенерации и отмывки на многоколоночной системе фильтров в многокомпонентных системах при переменных условиях на входе. Алгоритм «Createscheme» использует послойную модель счёта, параметры которой - длина слоя и шаг по времени выбираются из условий установления равновесия жидкой и твёрдой фаз на каждом шаге [2,4], там же приведены формулы для расчёта равновесия многокомпонентной системы в простейшем случае. Здесь дано описание алгоритма расчёта равновесия в общем виде, основанного на системе следующих уравнений:

уравнения равновесия ионов для катионного и анионного обмена

$$\frac{a_k}{c_k} = K_k^{z_k} \left(\frac{a_H}{c_H} \right)^{z_k}, \quad \frac{a_{js}}{c_{js}} = K_{js}^j \left(\frac{a_{OH}}{c_{OH}} \right)^j, \quad (1)$$

где c_k, a_k - мольные концентрации катионов в жидкой фазе и в сорбенте, c_{js}, a_{js} - мольные концентрации анионов с зарядом j в жидкой фазе и в сорбенте, a_H, c_H, a_{OH}, c_{OH} - мольные концентрации ионов водорода и гидроксила в сорбенте и жидкой фазе; уравнения диссоциации для кислот с основностью M_s :

$$\frac{c_H c_{j-1,s}}{c_{j,s}} = D_{js}; \quad \sum_{j=0}^{M_s} c_{js} = C_s, \quad (2)$$

где D_{js} - j -ая константа диссоциации, а C_s - суммарная мольная концентрация ионов и незаряженных форм s -ой кислоты, позволяют вычислить доли диссоциированных форм ω_{js} :

$$c_{js} = \omega_{js} C_s, \quad \omega_{0s} = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^{M_s} \frac{\Psi_{ks}}{c_H^k}}, \quad \omega_{k,s} = \frac{\Psi_{ks}}{c_H^k \left(1 + \sum_{m=1}^{M_s} \frac{\Psi_{ms}}{c_H^m} \right)}, \quad \Psi_{ks} = \prod_{j=1}^k D_{js}, \quad \sum_{j=0}^{M_s} \omega_{js} = 1; \quad (3)$$

уравнение электронейтральности в жидкой фазе:

$$c_{OH} + \sum_{s=1}^{kion} \sum_{j=1}^{M_s} j c_{js} = c_H + \sum_{k=1}^{kcat} z_k c_k, \quad (4)$$

где $kion, kcat$ - соответственно количество кислот с основностью M_s и количество катионов; уравнение электронейтральности в катионите с ёмкостью A_0 :

$$a_H + a'_H + \sum_{k=1}^{kcat} z_k a_k = A_0, \quad a'_H = \frac{a_H A_0}{a_H + K_c}; \quad (5)$$

уравнение электронейтральности в анионите с ёмкостью A_0 :

$$a_{OH} + a'_{OH} + \sum_{s=1}^{kion} \sum_{j=1}^{M_s} j a_{js} = A_0, \quad a'_{OH} = \frac{a_{OH} A_0}{a_{OH} + K_c}, \quad (6)$$

где K_c - константа диссоциации функциональных групп ионита; уравнения для суммарной мольной концентрации катионов Q_k и анионов W_s в подвижной и неподвижной фазах на единицу объёма порции жидкой фазы:

$$c_k + \frac{a_k}{v_m} = Q_k; \quad \sum_{j=0}^{M_s} c_{js} + \frac{1}{v_m} \sum_{j=1}^{M_s} a_{js} = W_s, \quad (7)$$

где v_m - отношение объёма порции к объёму слоя.

Из соотношений (1), (7) получаем:

$$c_k \left[1 + \frac{1}{v_m} K_k^{z_k} \left(\frac{a_H}{c_H} \right)^{z_k} \right] = Q_k, \quad c_{0s} + \sum_{j=1}^{M_s} c_{js} \left[1 + \frac{1}{v_m} K_{js}^j \left(\frac{a_{OH}}{c_{OH}} \right)^j \right] = W_s \quad (8)$$

Система уравнений (4) – (6) при подстановке (3), (8) сводится в случае катионного обмена к системе из двух нелинейных уравнений относительно переменных $x = c_H, y = a_H$:

$$F(x, y) = x + \sum_{k=1}^{kcat} z_k \frac{v_m Q_k}{v_m + K_k^{z_k} \left(\frac{y}{x} \right)^{z_k}} - \frac{10^{-14}}{x} - \sum_{s=1}^{kion} W_s \sum_{j=1}^{M_s} j \omega_{js} = 0, \quad (9)$$

$$G(x, y) = y + \frac{yA_0}{y + K_c} + \sum_{k=1}^{kcat} z_k \frac{v_m Q_k K_k^{z_k} \left(\frac{y}{x} \right)^{z_k}}{v_m + K_k^{z_k} \left(\frac{y}{x} \right)^{z_k}} - A_0 = 0, \quad \omega_{j,s} = \frac{\psi_{js}}{x^j \left(1 + \sum_{m=1}^{M_s} \frac{\psi_{ms}}{x^m} \right)}$$

В случае анионного обмена получаем аналогичную систему относительно переменных $x = c_{OH}, y = a_{OH}$:

$$F(x, y) = x + \sum_{s=1}^{kion} \frac{W_s v_m \sum_{j=1}^{M_s} j \omega_{js}}{v_m + \sum_{k=1}^{M_s} \omega_{ks} K_{ks}^k \left(\frac{y}{x} \right)^k} - \frac{10^{-14}}{x} - \sum_{k=1}^{kcat} z_k Q_k = 0 \quad (10)$$

$$G(x, y) = y + \frac{yA_0}{y + K_c} + \sum_{s=1}^{kion} \frac{W_s v_m \sum_{j=1}^{M_s} j \omega_{js} K_{js}^j \left(\frac{y}{x} \right)^j}{v_m + \sum_{k=1}^{M_s} \omega_{ks} K_{ks}^k \left(\frac{y}{x} \right)^k} - A_0 = 0$$

$$\omega_{k,s} = \frac{\psi_{ks}}{c_H^k \left(1 + \sum_{m=1}^{M_s} \frac{\psi_{ms}}{c_H^m} \right)} = \frac{10^{14k} x^k \psi_{ks}}{\left(1 + \sum_{m=1}^{M_s} 10^{14m} x^m \psi_{ms} \right)}$$

Решения системы уравнений (9) в случае катионного обмена и (10) в случае анионного обмена находятся непосредственно специальной подпрограммой, учитывающей все особенности выписанных уравнений. Параметры модели представлены в табл. 1.

Таблица 1 Параметры математической модели для расчета процесса очистки воды на катионите КУ-2

Наименование	Обозначение	Величина
Полная обменная емкость	a_0	1.9 кг- экв/м ³
Диаметр зерна	d	0.06 см
Порозность	ε	0.45
Коэффициент внешней диффузии (v - скорость потока см/сек)	$\beta = \frac{0.009 v^{0.53}}{d^{1.47}}$	1/сек
Коэффициент внутренней диффузии	$D_{\text{внвтр}}$	$2.3 \cdot 10^{-6}$ см ² /сек
Продольная диффузия	$D_{\text{прод}} = K v^n$	см ² /сек
Параметры при регенерации	K	1.8
	n	0.9
Параметры при отмывке	K	0.74
	n	1.36

Подготовка фильтра к промышленному эксперименту. В процессе подготовки фильтра к экспериментам по высоте фильтра были установлены устройства для отбора проб раствора. Предусмотрена возможность подачи в фильтр частично обессоленной воды к эжектору для регенерации и отмывки катионита.

Фильтр диаметром 3 м был загружен новым материалом КУ-2 Черкасского химкомбината, высота загрузки 200 см. Загрузка фильтра осуществлялась частично обессоленной водой от передвижного гидротранспортера. После загрузки было произведено взрыхление катионита Н-катионированной водой со скоростью 75 м³/час до отсутствия мелких фракций катионита в верхней части фильтра (продолжительность взрыхления 60 минут).

Точки контроля, в которых отбирались пробы в течение опытов, были установлены на входе в фильтр, на входе в слой катионита (выходе из пространства над слоем катионита), на середине слоя и на выходе из слоя. Выбор точек контроля обусловлен задачами эксперимента. На входе в фильтр измеряются содержание компонентов в очищаемой и отмывочной воде, а также проверяется концентрация регенерационного раствора. Концентрации компонентов на входе в слой необходимы при изучении гидродинамики регенерации и отмывки. Концентрация натрия в середине слоя позволяет получить полную выходную кривую наименее сорбируемого иона натрия, в то время как на выходе из фильтра его концентрация достигает проскока, при котором фильтр останавливали на регенерацию в соответствии с технологическим регламентом.

Схема обвязки фильтра представлена на рис. 1.

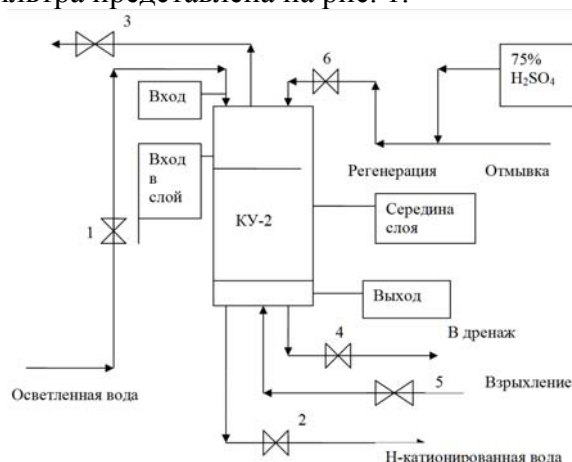


Рис. 1. Схема обвязки фильтра

Управление потоками в рабочем цикле осуществлялось через задвижки 1 и 2. Взрыхление проводилось через задвижки 5 и 3 осветленной водой, получаемой после предварительной очистки от примесей природной воды. При регенерации раствор серной кислоты проходит через фильтр сверху вниз при открытых задвижках 6 и 4. При отмывке фильтра отключалась подача кислоты и по линии регенерации через эжектор при открытых задвижках 6 и 4 подавалась вода. Скорость подачи растворов измерялась расходомером на всех стадиях. Давление до и после фильтра, давление перед дренажом измерялось образцовыми манометрами, установленными у фильтра. Частота отбора проб раствора объемом 250-500 см³ и точки контроля определялись характером стадии технологического процесса (табл.2). Пробы, отобранные в процессе экспериментов, анализировались на содержание ионов водорода, натрия, магния и кальция по стандартным методикам [9].

Таблица 2. Частота отбора проб в экспериментах, минуты

Стадия технологического процесса	Точки отбора проб			
	Вход в фильтр	Вход в слой	Середина слоя	Выход
Рабочий цикл	60	-	30	30
Регенерация	15	5	5	5
Отмывка	15	5	5	5

Эксперимент по изучению гидродинамики регенерации и отмывки. Гидродинамика регенерации и отмывки исследовалась на фильтре, заполненном катионитом КУ-2 в водородной форме и частично обессоленной водой, в которой содержание иона натрия и хлорид иона меньше $1 \cdot 10^{-4}$ кг-экв/м³. Промышленный фильтр состоит из двух частей: слоя и пространства над слоем катионита. Методика эксперимента по изучению гидродинамики регенерации и отмывки в промышленном фильтре заключалась в пропускании через фильтр раствора серной кислоты, приготовленного на частично обессоленной воде, и последующей отмывки фильтра от кислоты частично обессоленной водой. Начало и конец каждой стадии определялся моментом включения и отключения эжектора, осуществляющего подачу концентрированной серной кислоты для разбавления ее подаваемой в фильтр частично обессоленной водой. Снимались данные по серной кислоте в пространстве над слоем катионита (вход в слой) и на выходе из слоя. Выходные кривые заполнения фильтра раствором кислоты и отмывки его от кислоты получены при двух значениях концентрации раствора серной кислоты.

В процессе экспериментов на вход фильтра подавалась 2% серная кислота (0.2М) в течение 60 минут, затем 3% серная кислота (0.34М) в течение 30 минут. После этого катионит был отмыт частично обессоленной водой. Затем фильтр был повторно заполнен 3% раствором серной кислотой в течение 30 минут и отмыт.

Обсуждение результатов

Расчет гидродинамики заполнения пространства над слоем катионита раствором серной кислоты проводился по программе «Createscheme» с использованием модели идеального смешения двух жидкостей (частично обессоленная вода и регенерационный раствор). Стадия отмывки от серной кислоты пространства над слоем катионита описывается моделью идеального вытеснения.

Концентрации серной кислоты на выходе из пространства над слоем катионита, рассчитанные на основе этих моделей, являлись граничным условием для расчета гидродинамики заполнения слоя катионита раствором кислоты и его отмывки по программе «Createscheme».

Для расчета гидродинамики регенерации катионита и его отмывки были использованы коэффициенты зависимости продольной диффузии от скорости потока, полученные нами ранее на автоматизированном кондуктометрическом стенде АС-НИ-ГЕОХИ и занесенные в банк данных коэффициентов, приведены в предыдущих публикациях [7,8].

На рис.2 и 3 представлены выходные кривые серной кислоты на входе в слой ионита для двух значений концентрации кислоты: 2 и 3%. На рис.4 приведены выходные кривые отмывки пространства над слоем ионита от 3% серной кислоты.

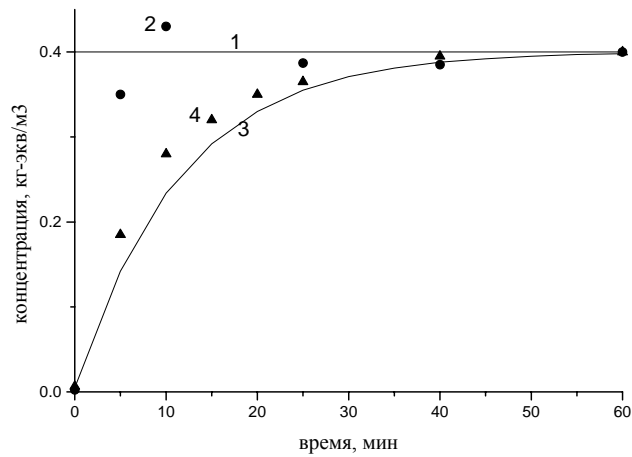


Рис. 2. Экспериментальная и расчетная выходные кривые серной кислоты на входе в слой катионита (1 – концентрация подаваемой 2% серной кислоты, 2 – результат титрования кислоты на входе в фильтр, 3 – расчетная выходная кривая кислоты на входе в слой, 4 – результат титрования кислоты на входе в слой)

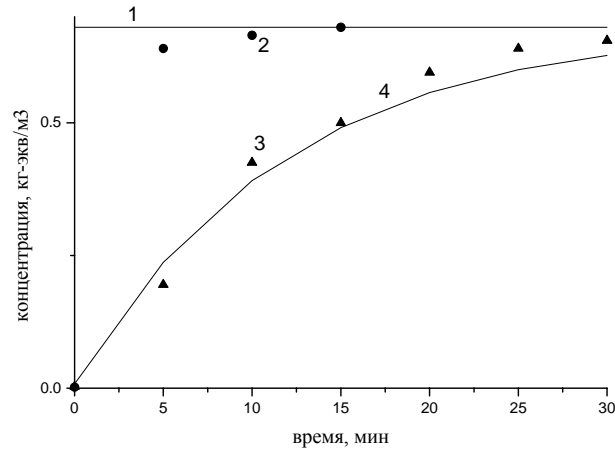


Рис. 3. Экспериментальная и расчетная выходные кривые серной кислоты на входе в слой катионита (1 – концентрация подаваемой 3% серной кислоты, 2 – результат титрования кислоты на входе в фильтр, 3 – результат титрования кислоты на входе в слой катионита, 4 – расчетная выходная кривая кислоты на входе в слой)

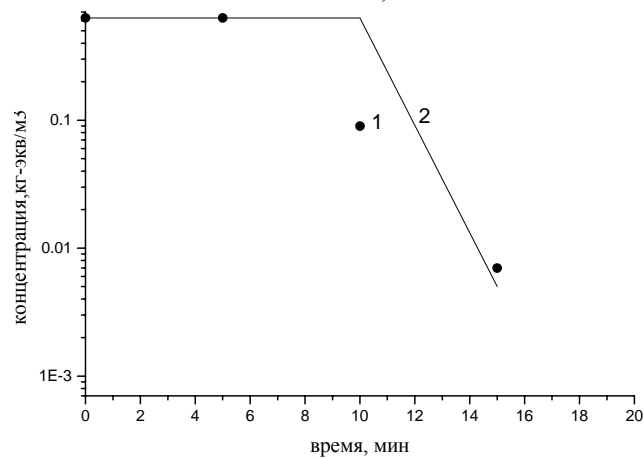


Рис. 4. Экспериментальная (1) и расчетная (2) выходные кривые отмывки водой пространства над слоем катионита от серной кислоты.

Из полученных данных следует, что выходные кривые серной кислоты на входе в слой катионита промышленного фильтра при заполнении фильтра кислотой отвечают модели идеального смешения, а при отмывке - модели идеального вытеснения.

Для изучения гидродинамики регенерации слоя катионита снимались кривые в двух сечениях фильтра: в середине слоя и на выходе из фильтра. Характер кривых в этих точках определялся гидродинамикой слоя и изменением во времени концентрации серной кислоты на входе в слой. Проведен расчет концентрации серной кислоты для этих двух сечений слоя с коэффициентами, полученными нами ранее на автоматизированном стенде с граничными условиями, учитывающими характер изменения концентрации на входе.

На рис. 5 и 6 приведено сопоставление экспериментальных и расчетных выходных кривых серной кислоты при скорости потока $54 \text{ м}^3/\text{час}$.

На рис. 7 приведены расчетная и экспериментальные выходные кривые отмывки на выходе из промышленного фильтра после заполнения фильтра 3% серной кислотой при скорости подачи частично обессоленной воды $54 \text{ м}^3/\text{час}$.

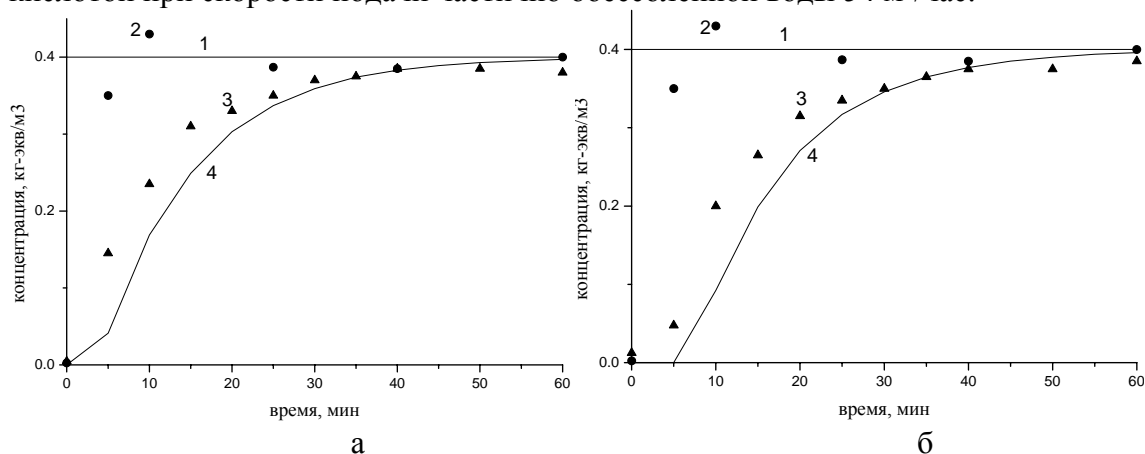


Рис. 5. Выходные кривые при заполнении 2% серной кислотой промышленного фильтра (а-середина, б-выход) (1-2% H_2SO_4 на входе в фильтр, 2 – результат титрования кислоты на входе в фильтр, 3 – эксперимент, 4 – расчет)

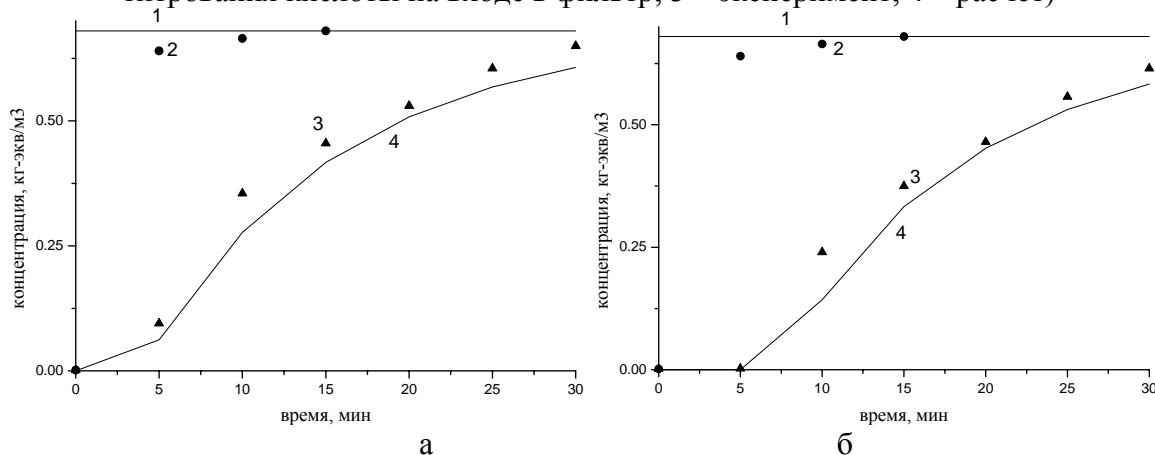


Рис. 6. Выходные кривые при заполнении 3 % серной кислотой промышленного фильтра (а-середина, б-выход) (1-3% H_2SO_4 на входе в фильтр, 2 – результат титрования кислоты на входе в фильтр, 3 – экспериментальная выходная кривая, 4 – расчетная выходная кривая)

Из представленных данных следует, что рассчитанные по программе и экспериментальные кривые серной кислоты на входе в слой, в срединном сечении и на выходе из фильтра удовлетворительно совпадают как при заполнении фильтра раствором кислоты, так и при отмывке. При заполнении фильтра кислотой изменение концентрации кислоты на входе и выходе из слоя является результатом размытия фронта кислоты за счет продольной диффузии в пространстве над слоем и в слое катионита.

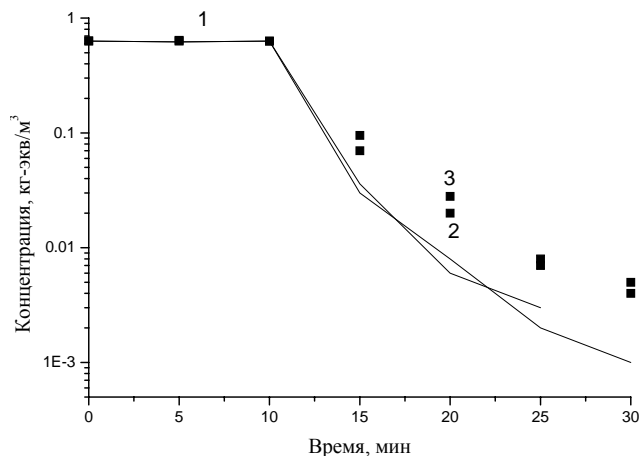


Рис. 7. Выходные кривые отмывки катионита частично обессоленной водой на выходе из промышленного фильтра после заполнения его 3% серной кислотой (1 – расчет, 2 и 3 – эксперимент)

Заключение

Гидродинамика стадий регенерации и отмывки технологического процесса очистки воды в промышленном фильтре определяется продольной диффузией, не зависит от масштаба фильтра и может быть рассчитана с использованием коэффициентов, определенных в стендовых испытаниях.

Список литературы

1. Сенявин М.М., Рубинштейн Р.Н., Веницианов Е.В., Галкина Н.К. и др. *Основы расчета и оптимизации ионообменных процессов*. М. Наука 1972. С.174
2. Сенявин М.М., Рубинштейн Р.Н., Комарова И.В., Смагин В.Н. и др. *Теоретические основы деминерализации пресных вод*. М. Наука. 1975. С.326
3. Комарова И.В., Галкина Н.К., Рубинштейн Р.Н., Сенявин М.М. *Журнал физической химии*. 1973. Т.47. № 1. С.124-129
4. Веницианов Е.В., Рубинштейн Р.Н. *Динамика сорбции из жидких сред*. М. Наука. 1983. С. 237
5. Комарова И.В., Закова И.М., Одинцов В.Ю., Лебедев В.Ю. *Теплоэнергетика*. 1983. №7. С.13-16
6. Галкина Н.К., Комарова И.В., Анфилов Б.Г., Шептовецкая К.И.. *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2004. Т. 4. № 5. С.644-652
7. Комарова И.В., Галкина Н.К., Шептовецкая К.И. *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2011. Т. 11. № 2. С.151-158
8. Прудковский А.Г., Комарова И.В., Галкина Н.К. *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2014. Т. 14. № 5. С.824-831
9. *Унифицированные методы исследования качества воды. Часть 1. Методы химического анализа воды*. СЭВ. 1987. С.592.

References

1. Senjavin M.M., Rubinshtejn R.N., Venicianov E.V., Galkina N.K. et al. Osnovy rascheta i optimizacii ionoobmennyh processov, M., Nauka, 1972, 174 p.
2. Senjavin M.M., Rubinshtejn R.N., Komarova I.V., Smagin V.N. et al., Teoreticheskie osnovy demineralizacii presnyh vod. M., Nauka, 1975, 326 p.
3. Komarova I.V., Galkina N.K., Rubinshtejn R.N., Senjavin M.M. *Zhurnal fizicheskoy himii*, 1973, Vol. 47, No 1, pp. 124-129.
4. Venicianov E.V., Rubinshtejn R.N. Dinamika sorbcii iz zhidkih sred. M., Nauka, 1983, 237 p.
5. Komarova I.V., Zakova I.M., Odincov V.Ju., Lebedev V.Ju., *Teplojenergetika*, 1983, No 7, pp. 13-16
6. Galkina N.K., Komarova I.V., Anfilov B.G., Sheptoveckaja K.I., *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2004. Vol. 4, No 5, pp. 644-652.
7. Komarova I.V., Galkina N.K., Sheptoveckaja K.I. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2011, Vol. 11, No 2, pp. 151-158.
8. Prudkovskii A.G., Komarova I.V., Galkina N.K., *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2014, Vol. 14, No 5, pp. 824-831.
9. Unificirovannye metody issledovaniya kachestva vody. Chast' 1. Metody himicheskogo analiza vody. SJeV. M., 1987, 592 p.

Комарова Ирина Владимировна к.х.н., старший научный сотрудник, лаборатория сорбционных методов, ГЕОХИ РАН

Галкина Надежда Константиновна – к.х.н., старший научный сотрудник, лаборатория сорбционных методов, ГЕОХИ РАН

Прудковский Андрей Гаральдович – д.ф.-м.н., старший научный сотрудник, лаборатория сорбционных методов, ГЕОХИ РАН,

Хамизов Руслан Хажсетович – д.х.н., Зав. лаборатории сорбционных методов, ГЕОХИ РАН

Komarova Irina V. – Ph.D. (Chem.), Senior researcher, Lab of Sorption Methods, GEOKHI RAS

Galkina Nadezda K. – Ph.D. (Chem.), Senior researcher, Lab. of Sorption Methods, GEOKHI RAS

Prudkovskii Andrei G. – Dr.Sci. (Phys/Math.), Leading researcher, Lab of Sorption Methods, GEOKHI RAS

Khamizov Ruslan Kh. Dr.Sci.(Chem), Head of the Laboratory of Sorption Methods, GEOKHI RAS