



УДК 66.5

## Многослойные и многосекционные фильтры – способ повышения эффективности сорбционных процессов

Веницианов Е.В.

*Институт водных проблем РАН, Москва*

Поступила в редакцию 4.09.2012 г.

### Аннотация

Рассматривается классификация задач оптимизации сорбционных процессов в технологии и аналитике. Показана более высокая эффективность многосекционных фильтров по сравнению с односекционными, а также двухслойного фильтра, состоящего из сорбента с высокой емкостью, но плохой кинетикой (первый слой) и невысокой емкостью, но хорошей кинетикой (второй слой).

**Ключевые слова:** мониторинг, водные объекты, математическая модель, дисперсия веществ, метод Монте-Карло

The classification of optimization of sorption processes in technology and analytics is considered. Better performance of multi-section filters than with single-section, as well as dual-layer filter consisting of a sorbent with high capacity, but poor kinetics (first layer) and low capacity, but the good kinetics (second layer).

**Keywords:** monitoring, water bodies, mathematical model, dispersion, Monte Carlo method

### Введение

Как известно, два фактора определяют эффективность любого технологического процесса сорбции – статика и кинетика. Если фактор статики является фундаментальным при выборе технологии, то фактор кинетики является управляемым за счет выбора технологических условий реализации процесса. В реальных условиях следует учитывать и третий фактор – экономический, как правило, определяемый через экономический критерий, или целевую функцию.

Наиболее распространенные области использования сорбционных технологий:

- очистка раствора, т.е. получение очищенной до определенных требований воды (растворителя);
- концентрирование, т.е. получение целевого продукта,
- разделение компонентов в аналитических целях как в хроматографии или для технологических целей.

При этом используются различные критерии:

- приведенные затраты на получение единицы продукта, например чистой воды или чистого вещества;
- эффективность разделения при хроматографии;

• затраты времени при массовом концентрировании перед последующим аналитическим определением и пр.

Выбор конструкции фильтров и параметров процесса сорбции, в конечном счете, определяется оптимизацией, которая заключается в поиске экстремума (максимума или минимума) критерия.

Критерий оптимизации может быть только один, число варьируемых параметров процесса любое.

На практике, как правило, возникают многокритериальные задачи, например, необходимо минимизировать затраты на получение продукции и в то же время минимизировать время процесса или достичь максимального качества. Необходимость введения единственного критерия диктует необходимость эвристических подходов в оптимизации, например, перевод некоторых критериев в ограничения. Например, если нам важно минимизировать наряду с затратами время процесса, можно установить максимальное значение времени процесса, которое при оптимизации нельзя нарушить. Другим вариантом является объединение критериев в один, например, суммированием частных критериев с помощью весовых коэффициентов.

В технологических процессах различают три задачи оптимизации:

- поиск оптимальной конструкции или технологической схемы;
- поиск оптимальных параметров реализации выбранной технологической схемы;
- оптимальное управление технологическим процессом.

Для решения каждой из указанных задач используются разные методы.

Базовой является задача оптимизации процесса для выбранной схемы. Критерием является – или минимизация приведенных затрат на единицу продукции или при заданных затратах максимизация произведенного продукта. Варьируемыми являются технологические параметры.

При оптимизации сорбционных процессов используются математические модели процессов. Модель процесса может задаваться в детерминированной форме, т.е. в виде системы уравнений, описывающих технологический процесс, или в форме регрессионных уравнений, полученных на основе статистической обработки большого числа экспериментальных данных.

При корректной формулировке для решения задачи оптимизации используются известные математические методы: нелинейного или линейного программирования. В последнее время появились новые методы оптимизации – генетические алгоритмы [1].

Поиск оптимальной конструкции – оптимизация другого уровня. Идеальным решением является сравнение оптимальных режимов для каждой их конструкций. Однако это подход требует больших затрат. Поэтому на практике пользуются, как правило, эвристическими методами.

Третий тип задач возникает вследствие стохастического, как правило, характера технологического процесса. Он определяется, как правило, большим количеством режимных переменных. На процесс действуют возмущающие воздействия, например, изменяется качество поступающего сырья (очищаемой воды), а также происходит непрерывное изменение параметров процесса, например, при изменении температуры в реакторе меняется скорость процесса.

Оптимальное управление – раздел математики, использующий вариационные методы. При этом необходимо математическое описание управляемого объекта и наличие

"рулей", т.е. управляющих параметров, влияющих на ход процесса. Возникает задача об отыскании наилучшего (оптимального) управления процессом. Например, речь может идти о достижении цели с минимальными затратами или за минимальное время.

В настоящее время эта теория находит реализацию в виде автоматизированных систем управления.

Далее рассматривается способ решения первой задачи оптимизации, т.е. задачи нахождения оптимальной конструкции сорбционного фильтра, возникающей, например, при очистке растворов.

### Очистка воды на многосекционном фильтре

При использовании односекционного фильтра эффективность очистки всегда ниже 100%, т.е. меньше термодинамической емкости. Это, в основном, объясняется кинетическими факторами.

Для идеальной, т.е. мгновенной кинетики сорбционный фронт при выпуклых изотермах представляет вид поршня, или прямоугольного фронта, перемещающегося по слою со скоростью

$$w = v/\Gamma,$$

где  $\Gamma$  – коэффициент распределения для сорбируемого компонента:

$$\Gamma = a_0/c_0,$$

где  $c_0$  – исходная концентрация сорбируемого компонента в загрязненной воде,  $a_0$  – равновесная по уравнению изотермы концентрация того же компонента в сорбенте.

Теория выделяет три основных механизма кинетики:

- внешняя диффузия, т.е. подвод вещества к поверхности сорбента;
- внутренняя диффузия, т.е. диффузия внутрь зерна,
- продольная дисперсия, т.е. размытие фронта концентрации за счет эффектов неоднородности поля скоростей и пр. эффектов.

Кинетика – неизбежная «плата» за приемлемость гидродинамических условий, т.е. затрат на прокачку воды через слой сорбента. С одной стороны, чем тоньше зернение фильтра, тем лучше кинетика, с другой, – тем выше гидравлическое сопротивление. Эмпирически компромисс этих противоречивых требований установлен на уровне миллиметровых размеров зерен для большинства сорбционных фильтров. При этих зернениях и скоростях порядка метров в час, что также диктуется технологическими требованиями, ширина концентрационного фронта вследствие кинетических факторов достигает десятков процентов от толщины фильтрующего слоя, так что при достижении требуемого уровня проскока часть емкости фильтра оказывается неиспользованной.

Традиционно в инженерных расчетах используется формула Шилова для определения времени защитного действия сорбционного фильтра:

$$t_3 = l/w - \tau \quad (1)$$

где  $l$  – длина фильтрующего слоя,  $\tau$  – поправка, связанная с неидеальной («размытой») формой фронта концентрации.

Наиболее эффективными в технологии являются сорбенты, обладающие высокой емкостью и соответственно высоким уровнем сродства по отношению к группе извлекаемых при сорбции загрязняющих веществ (ЗВ). Такими сорбентами являются, например, иониты, применяемые при обессоливании воды или активированные угли при извлечении нефтепродуктов. В этом случае изотерма

является сильно выпуклой. И ее с достаточно высокой точностью можно аппроксимировать прямоугольной.

Модель динамики в этом случае имеет вид:

$$\partial a / \partial t = \beta(a)C \quad (2)$$

где  $\beta(a)$  – кинетический коэффициент, определяемый уравнением:

$$\beta(a) = \{ \beta_0 \text{ при } a < a_0, 0 \text{ при } a = a_0 \} \quad (3)$$

Краевые условия:

$$C(0, t) = C_0, a(x, 0) = \varphi(x)$$

В частном случае  $\varphi(x) = 0$  (динамика на чистой колонке) решение задачи динамики сорбции в безразмерных переменных имеет вид:

$$\begin{aligned} U(X, T) &= \exp(-X), q(X, T) = T \exp(-X) \text{ при } 0 \leq T \leq 1, \\ U(X, T) &= q(X, T) = \exp(-X + T - 1) \text{ при } 1 \leq T \leq 1 + X \\ U(X, T) &= q(X, T) = 1 \text{ при } T \geq 1 + X \end{aligned} \quad (4)$$

где  $U = C/C_0$ ,  $q = a/a_0$  – безразмерные концентрации,  $v$  – скорость потока (см/с),  $C_0$  – входная концентрация ЗВ,  $a_0$  – емкость фильтра,  $a$  безразмерные длина и время вводятся по формулам:

$$X = \beta x / v, T = \beta t / \Gamma$$

где  $\beta$  – коэффициент внешней диффузии (в пленке или суммарный по застойной и проточной зонам), коэффициент распределение равен отношению емкости фильтра  $a_0$  к входная концентрация ЗВ  $C_0$ :

$$\Gamma = a_0 / C_0,$$

Время защитного действия  $t_3(c)$  для первоначально чистого слоя сорбента определяется по формуле:

$$t_3 = \Gamma / v l + \Gamma / \beta (1 - 2,31 \lg C_0 / C_n)$$

где  $C_n$  – требуемая (нормативная) концентрация на выходе из фильтра,  $l$  – длина фильтрующего слоя (см).

Отношение  $C_0 / C_n$  всегда больше 1, поэтому второе слагаемое в скобке является той самой величиной  $\tau$ , которая входит в формулу Шилова и уменьшает время защитного действия.

Обозначим время защитного действия односекционного фильтра через  $t_{30}$ , когда выходная концентрация достигает допустимого уровня проскока.

Сравним его эффективность с секционным (число секций –  $n$ ), когда происходит замена максимально отработанной секции.

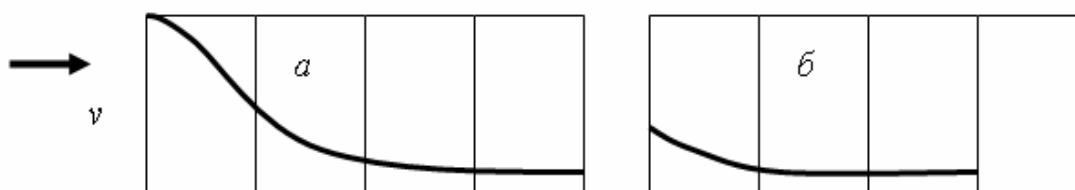


Рис.1. Смена отработанной секции при достижении времени защитного действия  $t_{30}$ :

$a$  – распределение загрязнения по слою в момент  $t_{30}$ ;  $b$  – удаление первой наиболее загрязненной секции и дополнение чистой секции в хвостовую часть.  
 $v$  – скорость

На рис. 1 представлена процедура смены секций после достижения времени защитного действия  $t_{30}$  (первая сорбция происходит на чистом слое). Первая по ходу потока секция изымается на регенерацию. Вторая секция становится первой, третья – второй и т.д., а секция, наполненная чистым сорбентом, помещается в конце слоя.

Далее очистки идет на частично загрязненном слое.

Дает ли эффект посекционная смена фильтрующего слоя? Будем вести сравнение двух конструкций: 1. односекционной, 2. многосекционной.

**Конструкция 1.** Меняем фильтр полностью. Тогда время защитного действия –  $t_{31} = t_{30}$ .

**Конструкция 2.** Заменяем одну секцию (объем  $V/n$ ). При смене  $n$  секций полностью обновим первоначальный фильтр. Суммарное время защитного действия обозначим через  $t_{32}$ .

Как соотносятся эти времена?

**Конструкция 1.** Время защитного действия является решением сформулированной задачи и в безразмерных переменных равно:

$$T_{\Pi} = X_0 + 1 + \ln u_{\Pi}$$

где  $u_{\Pi}$  – безразмерная проскоковая концентрация, равная  $C_{\Pi}/C_0 < 1$ . Размерное время защитного действия чистого фильтра равно:

$$t_{31} = \Gamma T_{\Pi} / \beta$$

т.е. тем больше, чем больше коэффициент распределения, т.е. емкость фильтра, и чем меньше кинетический коэффициент  $\beta$ .

Рассмотрим решение задачи динамики сорбции на секционном фильтре.

**Конструкция 2.**

**Этап 1.** Фильтрация на чистом слое. Решение совпадает с рассмотренным выше решением для односекционного фильтра и время защитного действия то же:

$$T_{\Pi} = X_0 + 1 + \ln u_{\Pi}$$

Из решения легко найти толщину лобового слоя  $\Delta$ , где произошла полная отработка слоя в момент проскока  $T_{\Pi}$ .

$$\Delta = X_0 + \ln u_{\Pi}$$

Толщина лобового слоя меньше  $X_0$ , так как  $\ln u_{\Pi} < 0$ . В этот момент распределение осадка по слою представляет рис. 2.

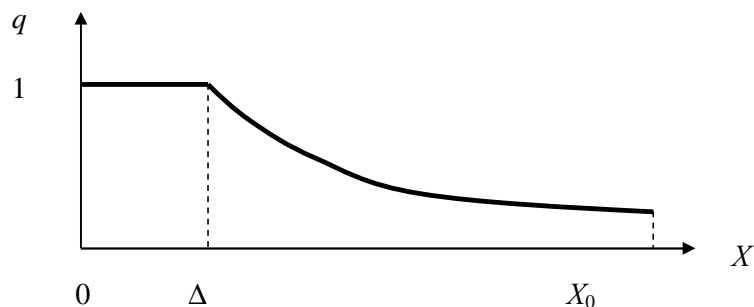


Рис. 2. Распределение осадка по слою фильтра в момент проскока  $T_{\Pi}$

**Этап 2.** Далее лобовой слой  $\Delta$  удаляется, а в хвостовую часть фильтра подключается секция с полностью регенерированным сорбентом. Далее вновь начинается фильтрация на слое, имеющем распределение, представленное на рис. 3. Решение исходной системы (2,3) ведется при частично отработанном слое и для прямоугольной изотермы находится в аналитической форме. Проскок  $C_{\Pi}$  наступает в момент времени  $T_{\Pi,2} = \Delta$ .

Обратим внимание на важную особенность решения. При всех перезагрузках, как и на первоначально полностью чистом фильтре, в момент проскока  $C_{\Pi}$  отрабатывается лобовой слой одной и той же длины  $\Delta$ . Время работы при каждой перезагрузке до проскока равно  $\Delta$ :

$$T_{\Pi,i} = \Delta$$

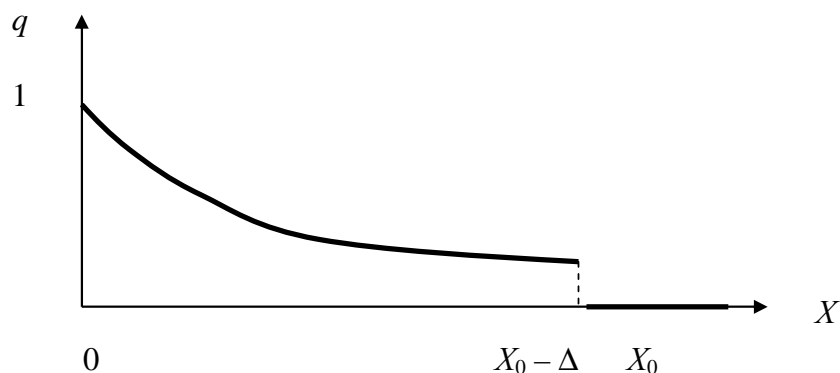


Рис. 3. Распределение осадка по слою фильтра в момент перегрузки

Таким образом, если толщина отработанного слоя  $\Delta$  равна  $X_0/n$ , то до **полной смены слоя** потребуется  $n$  замен отработанных слоев, так что полное время защитного действия в варианте 2 (см. выше) потребуется время

$$T_{32} = X_0.$$

Если перейти к размерным переменным, то получим следующий результат:

$$t_3 = l/w = l\Gamma/v$$

По формуле Шилова  $\tau = 0$ .

Время защитного действия многосекционного фильтра соответствует процессу с мгновенной кинетикой! Следовательно, многосекционный фильтр при достаточной глубокой очистке **всегда** более эффективен, чем односекционный.

**Пример.** Рассмотрим следующие характеристики фильтрации: скорость  $v = 1$  см/с, диаметр зерен  $d = 0,1$  см, коэффициент распределения  $\Gamma = 300$ , уровень проскока  $u_{\text{п}} = 0,01$ . Как правило, очистка происходит в области внешней диффузии, когда кинетический коэффициент хорошо аппроксимируется формулой:

$$\beta = 0,009v^{0,5}d^{-1,5} = 0,009 \times 1,8 \times 30 \approx 0,3 \text{ с}^{-1}$$

Для односекционного фильтра, чтобы обеспечить требуемую глубину очистки  $u_{\text{п}} = 0,01$  безразмерная длина  $X_0 = \beta l/v$  должна быть не менее  $X_{0\text{min}} = -\ln 0,01 = 4,6$ , т.е. размерная длина  $l$  должна быть не менее 15,3 см. Даже если число секции  $n$  равно 2, для односекционного фильтра время защитного действия будет равно 5600 с, а если его заменить двухсекционным, то 9200 с, т.е. на 64 % больше.

Второй важный результат заключается в том, что наиболее значительный выигрыш по времени защитного действия будет при большем числе секций  $n$ . Разумеется, увеличение числа секций лимитируется технологическими условиями. Конструкция много секционного фильтра может быть такой, что отключение и подключение секций может осуществляться переключением кранов.

### Очистка воды на двухслойном сорбенте

Для очистки загрязненных поверхностных вод часто используются недорогие сорбенты, позволяющие очищать воду от таких наиболее типичных загрязняющих веществ, как нефтепродукты. К ним относятся локальные очистные сооружения (ЛОС). Весьма перспективной представляется конструкция ЛОС, предложенная Р.И.Аюкаевым, для очистки поверхностного стока с автомобильных дорог. В основу проектирования были заложены следующие требования:

- малое превышением полотна дороги над рельефом – от 0,3 м;

- наземное расположение, движение стоков самотёчное;
- сброс очищенных стоков осуществляется на рельеф местности.

Ключевым устройством самотечной конструкции является сорбционный фильтр, основной особенностью которого является небольшая толщина активного фильтрующего слоя. Одним из важных требований к сорбенту является его небольшая стоимость, чтобы после исчерпания его емкости можно было направить фильтр на утилизацию.

С учетом показателя «цена – качество» в конструкции фильтра были использованы три разновидности сорбентов: пенополиуретан, модифицированные торфоплиты «ЭФТ», изготавливаемые из дешевого природного материала – торфа, и сорбент марки «Новосорб» на минеральной основе, используемый при очистке загрязненных нефтепродуктами стоков. Предусмотрена предочистка дождевого стока, включающая песколовку и тканевый фильтр, чтобы предотвратить попадание взвесей на поверхность сорбентов.

Экспериментально были оценены сорбционные характеристики указанных сорбентов (см. табл. 1). Изотермы сорбции были сильно выпуклыми, поэтому для теоретического анализа была выбрана модель прямоугольной изотермы.

Таблица 1. Оценка сорбционных свойств многослойного фильтра

Сорбент	Коэффициент распределения $\Gamma$	Кинетический коэффициент при скорости фильтрования 0,1 см/сек
пенополиуретан	3300	$0.08 \text{ с}^{-1}$
торфоплит ЭФТ	1380	$0.16 \text{ с}^{-1}$
новосорб	560	$0.32 \text{ с}^{-1}$

Пенополиуретан обладает самой высокой емкостью, но самой плохой кинетикой, торф обладает промежуточными свойствами. Новосорб имеет самую низкую емкость и самые высокие кинетические свойства.

Если фильтрующий слой будет состоять из одного пенополиуретана, он может не обеспечить достаточную глубину очистки стока вследствие плохой кинетики, а слой из торфоплит может обеспечить достаточную глубину очистки, но вследствие невысокой емкости не обеспечит достаточное время защитного действия.

Использование новосорба с низкой емкостью возможно лишь в качестве «страховочного» слоя для обеспечения доочистки в случае проскока.

Рассмотрим модель **двухслойного фильтра**. Первый слой состоит из сорбента с емкостью  $a_{01} \equiv c_0 \Gamma_1$ , кинетическим коэффициентом  $\beta_1$  и толщиной слоя  $l_1$  (здесь  $c_0$  – концентрация загрязняющего вещества на входе в слой сорбента,  $\Gamma_1$  – коэффициент распределения первого сорбента). Второй слой состоит из сорбента соответственно емкостью  $a_{02} \equiv c_0 \Gamma_2$  ( $\Gamma_2$  – коэффициент распределения второго сорбента), кинетическим коэффициентом  $\beta_2$  и толщиной слоя  $l_2$ , причем  $l_1 + l_2 = l$  – фиксированная толщина двух слоев.

**Является ли двухслойный сорбент более эффективным, чем однослойный?**

Рассмотрим решение задачи динамики при прямоугольной изотерме для двухслойного сорбента.

Запишем решение для I слоя, введя безразмерные переменные ( $X_1 = \beta_1 x / v$ ,  $T_1 = \beta_1 t / \Gamma_1$ ,  $u = c / c_0$ ,  $q_1 = a / a_{01}$ ):

$$u = \exp(-X_1), \quad q_1 = T_1 \exp(-X_1) \quad \text{при } t \leq t_{\phi,1} \equiv \Gamma_1 / \beta_1 \text{ или } T_1 \leq 1 \quad (5)$$

$$u = q_1 = \exp(-X_1 + T_1 - 1) \quad \text{при } t_{\phi,1} < t \leq t_{\phi,1} + \Gamma_1 x/v \text{ или } 1 \leq T_1 \leq 1 + X_1. \quad (6)$$

Заметим, что в момент времени  $t = t_{\phi,1} \equiv \Gamma_1/\beta_1$  (или  $T_1 = 1$ ) происходит насыщение лобового слоя фильтра и далее по слою распространяется волна концентрации со скоростью  $v/\Gamma_1$ . При этом на выходе из первого слоя происходит нарастание проскоковой концентрации  $u$ .

Для второго слоя возможны три варианта решения:

1. Насыщение лобового слоя II сорбента происходит позже, чем происходит насыщение лобового слоя I сорбента.

2. Насыщение лобового слоя II сорбента происходит одновременно с насыщением лобового слоя I сорбента.

3. Насыщение лобового слоя II сорбента происходит раньше, чем происходит насыщение лобового слоя I сорбента.

В варианте 2, когда насыщение лобовых слоев происходит одновременно, в течение времени  $t \leq \Gamma_1/\beta$  обеспечивается уровень проскока  $u_{np} = \exp(-X_{20} - X_{10})$ , где  $X_{10}$  – безразмерная длина первого слоя, равная  $\beta_1 l_{10}/v$ , а  $X_{20}$  – безразмерная длина второго слоя, равная  $\beta_2 l_{20}/v$ . Если требуемый уровень очистки  $u_{норм} = u_{np}$ , то суммарная длина фильтра, равная  $l_1 + l_2$ , является минимальной. Увеличение как  $l_1$ , так и  $l_2$ , приведет как к уменьшению проскоковой концентрации  $u_{np}$ , так и времени защитного действия.

Поэтому проверить эффективность двухслойного фильтра по сравнению с однослойным целесообразно для фильтра, когда реализуется вариант 2.

Вычислим момент времени  $t_{\phi,2}$ , когда происходит насыщение лобового слоя второго сорбента.

Для моментов времени  $t \leq t_{\phi,1}$  на входе во второй слой поддерживается постоянная концентрация  $u = \exp(-X_1)$ . Для этих моментов времени решение для второго слоя для прямоугольной изотермы имеет вид:

$$u = \exp(-X_2 - X_{10}), \quad q_2 = T_2 \exp(-X_{10} - X_2) \quad \text{при } t \leq t_{\phi,2} \equiv \Gamma_2/\beta_2 \text{ или } T_2 \leq 1$$

где введены безразмерные переменные  $X_2 = \beta_2 x/v$ ,  $T_2 = \beta_2 t/\Gamma_2$ ,  $q_2 = a/a_{02}$ .

Проскоковая концентрация будет равна:

$$u_{np} = \exp(-X_{20} - X_{10})$$

а момент времени насыщения второго слоя находим из уравнения

$$q_2 = T_{2,\phi} \exp(-X_{10}) = 1, \text{ т.е. } T_{2,\phi} = \exp(X_{10})$$

или в размерных переменных

$$t_{\phi,2} = \Gamma_2/\beta_2 \exp(X_{10}). \quad (7)$$

Следовательно, вариант 2 ( $t_{\phi,1} = t_{\phi,2}$ ) реализуется при выполнении условия

$$\exp(X_{10}) = \frac{\Gamma_1 \beta_2}{\Gamma_2 \beta_1}. \quad (8)$$

В нашем случае (см. табл.1)  $\exp(X_{10}) = 4,8$ , т.е.  $X_{10} = 1,6$ , или в размерных переменных  $l_1 = 2$  см при скорости фильтрования 0,1 см/с, которая по данным экспериментов реализуется в реальном тонкослойном фильтре, состоящем из пенополиуретана и торфорплит ЭФТ.

Минимальная толщина второго слоя следует из требования, чтобы проскоковая концентрация на втором слое (соответственно для всего фильтра) при  $t \leq t_{\phi,1} \equiv \Gamma_1/\beta$  была равна нормативной концентрации  $c_{пдк}$  (соответственно  $u_{пдк} = c_{пдк}/c_0$ ), а именно из условия

$$u_{пдк} = \exp(-X_{10} - X_{20})$$

которое можно преобразовать к виду:



$$-X_{20} = \ln\left(\frac{u_{\text{ндк}} \Gamma_1 \beta_2}{\Gamma_2 \beta_1}\right), \text{ или } l_2 = \frac{v}{\beta_2} \ln\left(\frac{\Gamma_2 \beta_1}{u_{\text{ндк}} \Gamma_1 \beta_2}\right) \quad (9)$$

Для конкретного сооружения по техническим условиям концентрация нефтепродуктов в талой воде оценивается в  $c_0 = 15,6$  мг/л, а требуемый уровень очистки –  $c_{\text{пдк}} = 0,05$  мг/л, т.е. требуемая степень очистки  $u_{\text{пдк}} = 0,0032$ .

Подставляя в (7), находим  $l_2 = 2,8$  см. Найдем также время защитного действия фильтра:

$$t_{\text{ф},1} = \Gamma_1 / \beta_1 = 41250 \text{ с}$$

Общая толщина слоя фильтра составит  $l = l_1 + l_2 = 4,8$  см

Рассмотрим варианты, когда рассматриваемый слой минимальной длины будет состоять либо из первого сорбента, либо из второго.

1. Слой 4,8 см из первого сорбента обеспечит проскок

$$u_{1\text{пр}} = \exp(-\beta_1 l / v) = \exp(-3,84) = 0,0215,$$

который значительно превышает требуемый проскок  $u_{\text{пдк}} = 0,0032$ .

2. Слой 4,8 см из второго сорбента обеспечит требуемый проскок, он будет равен

$$u_{2\text{пр}} = \exp(-\beta_2 l / v) = \exp(-7,68) = 0,00046,$$

что значительно меньше, чем требуемый проскок  $u_{\text{пдк}} = 0,0032$ . Однако время защитного действия, которое можно рассчитать по формуле

$$u_{\text{пдк}} = \exp(-X + T - 1)$$

будет равно 25200 с, т.е. составляет 0,61 от времени защитного действия двухслойного фильтра.

Это доказывает более высокую эффективность двухслойного фильтра

Увеличить время защитного действия можно, увеличивая толщину I и II слоев. Наиболее эффективно увеличение толщины слоя с более высокой емкостью.

## Заключение

Многосекционный фильтр, состоящий из сорбента при внешнедиффузионной динамике и прямоугольной изотерме работает в режиме мгновенной кинетики, т.е. эффективнее однослойного фильтра.

Двухслойный фильтр с расположением слоев: I слой – сорбент, обладающий самой высокой емкостью из исследованных сорбентов, II слой – сорбент, не обладающий высокой емкостью, но имеющие высокие кинетические свойства, достаточными, чтобы обеспечить требуемую глубину очистки, обеспечивает значительно более высокое время защитного действия, чем однослойные фильтры.

## Список литературы

1. Дьяконов, В.П., Круглов В.В. Инструменты искусственного интеллекта и биоинформатики – М.: СОЛОН ПРЕСС, 2006. – 456с.

**Веницианов Евгений Викторович** – д.ф.-м.н., профессор, зав. лабораторией охраны вод Института водных проблем РАН, Москва

**Venitsianov Yevgeny V.** - Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor Institute of Water Problems of Russian Academy of Sciences, Head of the Laboratory, Moscow, e-mail: [eugeniy.venitsianov@gmail.com](mailto:eugeniy.venitsianov@gmail.com)