

УДК 628.3

ЕЛЕНА ОЛЕГОВНА ГРАФОВА

кандидат технических наук, ассистент кафедры водоснабжения, водоотведения и гидравлики строительного факультета ПетрГУ
chistayavoda@rambler.ru

РЕНАТ ИСХАКОВИЧ АЮКАЕВ

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водоснабжения, водоотведения и гидравлики
chistayavoda@rambler.ru

ЕВГЕНИЙ ВИКТОРОВИЧ ВЕНИЦИАНОВ

доктор физико-математических наук, профессор Института водных проблем РАН, г. Москва
venits@aqua.laser.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ИССЛЕДОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ВОДООЧИСТКИ**Сообщение 2. «Сухое» фильтрование**

В водоснабжении загородных объектов перспективно применение «сухих» фильтров. Приводятся результаты математического моделирования процесса «сухого» фильтрования. Дано объяснение эффекта «пленочного» массообмена.

Ключевые слова: «сухое» фильтрование, пленочное течение, зернистый слой, математическое моделирование, водоснабжение загородных объектов

В [4] изложены доводы, побудившие нас обратиться к исследованию процесса «сухого» фильтрования – случайно переведенный в такой режим обычный зернистый скорый фильтр при очистке нефтесодержащих стоков оказался крат-но более производительным. Под термином «сухое» фильтрование в отечественной литературе известны работы ВНИИ ВОДГЕО [1] по обезжелезиванию подземных вод и НИИ КВОВ [5] по глубокому удалению из сточных вод аммония солевого, органических и взвешенных веществ.

Издавна для обезжелезивания подземной воды применяют метод упрощенной аэрации и фильтрования через затопленную зернистую загрузку крупностью 0,8–2 мм. Продолжительность фильтроцикла составляет обычно 16–24 ч.

При обезжелезивании подземной воды по методу «сухого» фильтрования верхний слой загрузки фильтра не затоплен, вода стекает под действием силы тяжести тонкой пленкой по крупнозернистой загрузке, затем фильтруется через мелкие фракции затопленной загрузки фильтра; при аэрофильтрации фактическая ско-

рость течения воды в порах (до 200 м/ч) почти в 30 раз выше, чем в «затопленных» фильтрах; продолжительность фильтроцикла в «затопленных» фильтрах не более одних суток, в аэро-фильтрационных – 30 суток при одинаковой глубине очистки от железа.

В докторской диссертации Н. А. Залетовой [5] разработана новая технология биологической доочистки на фильтре, работающем по принципу «сухого» фильтрования для глубокого удаления аммония солевого, органических и взвешенных веществ. В качестве загрузки используется зернистый полистирол крупностью 2–7 мм, который выполняет две функции – одновременно и фильтрующая загрузка, и носитель иммобилизованной микрофлоры. Исходная вода разбрызгивается по поверхности загрузки. Легкий материал обеспечивает при укладке в воду и при промывке гидравлическое распределение с убывающей по фильтрационному потоку крупностью зерен. Растет использование грязеемкости загрузки, фильтроциклы увеличиваются до 20–30 суток.

Сервисное обслуживание большого количества систем водоснабжения и водоотведения загородных АЗС и объектов придорожного сервиса позволило нам выявить преимущества технологий и установок, когда межрегенерационный период рабочих элементов велик, вместо регенерации на месте можно перейти на простую замену отработавших элементов на резервные, а регенерацию отработавших производить в стационарных условиях на производственной базе. Так родилась конструкция «сухого» фильтра с выдвижными кассетами. На рис. 1 представлена схема «сухого» сорбционного фильтра кассетного типа.

Изначально была сформулирована феноменологическая модель «сухого» многокассетного фильтра, экспериментально получены некоторые параметры процесса, на практике показана состоятельность идеи.

При разработке модели «сухого» секционного фильтра приняты во внимание три особенности процесса:

1. Фильтрование воды происходит в водовоздушной, то есть в трехфазной среде (твердое тело – жидкость – газ), и в поровом пространстве не образуется сплошного тока воды. Вода образует пленочное (а не струйное) течение.

2. Фильтрация происходит в пульсационном режиме: подача загрязненной порции воды чередуется с периодами без подачи воды, когда пленка воды стекает, осадок и поверхность зерен фильтра оказываются в воздушной среде.

3. Секционная конструкция фильтра. При достижении времени защитного действия t_3 первая секция изымается, вторая секция (частично загрязненная) становится первой, а новая чистая секция ставится в конец фильтра. Остановимся на последствиях этих особенностей для механизма фильтрации.

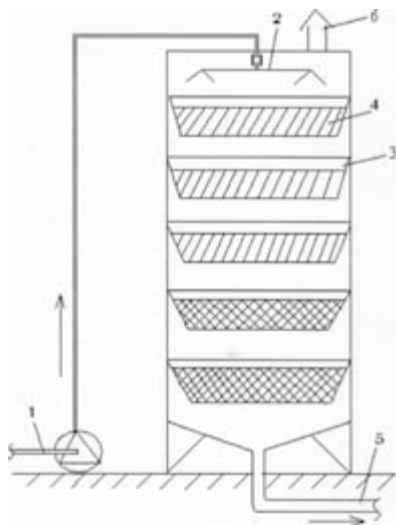


Рис. 1. Схема «сухого» сорбционного фильтра кассетного типа:

1 – исходный сток; 2 – распылитель; 3 – выдвижная секция с перфорированным дном; 4 – сорбент; 5 – выпуск очищенного (доочищенного) стока; 6 – вытяжка

ВЛИЯНИЕ ПЛЕНОЧНОГО ХАРАКТЕРА ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ФИЛЬТРУЮЩЕМ СЛОЕ НА КИНЕТИКУ ПРОЦЕССА

При фильтрации жидкости в зернистом слое сплошным потоком происходит сложный процесс массопередачи загрязняющего вещества к поверхности частицы, имеющий следующие особенности [3].

1. Формируются застойные и проточные зоны. В проточных зонах реализуется струйное течение, в застойных зонах водообмен со струйным течением затруднен и происходит по границам застойных зон. Адвекция, то есть перенос воды и вещества, происходит в основном по проточным (струйным) зонам, которые составляют часть порового объема. Объем застойных зон зависит от числа Рейнольдса и при значениях $Re \sim 1-10$ составляет до 50 % порового пространства [6].

2. Массоперенос осуществляется сначала от проточных к застойным зонам, где далее совершается массоперенос к поверхности частиц (рис. 2), причем если первая стадия (от проточных к застойным зонам) – процесс быстрого массопереноса, определяемый макропереносом за счет дисперсии поля локальных скоростей течения, то второй процесс (массоперенос в застойных зонах к поверхности) в значительной мере – диффузионный перенос к поверхности зерна. Мы исследовали этот процесс и построили модель сорбции с проточными и застойными зонами.

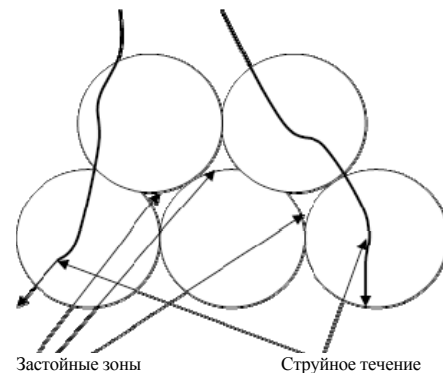


Рис. 2. Схема потока при однофазном течении

Сделаем оценку происходящих изменений в кинетике для двух схем течения.

При фильтрации жидкости в зернистом слое процесс массопередачи загрязняющего вещества (ЗВ) к поверхности зерна проходит по следующей схеме:

- В зернистом слое формируются застойные и проточные зоны. Адвекция происходит, в основном, по проточным (струйным) зонам, которые составляют часть от порового объема.
- Массоперенос ЗВ осуществляется сначала от проточных к застойным зонам, где далее совершается массоперенос к поверхности частиц.

$$\frac{dC_{33}}{dt} = \beta_1(C - C_{33}), \quad \frac{da}{dt} = \beta_2(C_{33} - f^{-1}(a)), \quad (1.1)$$

где $C(x, t)$ – концентрация ЗВ в проточной зоне (г/дм³ воды), $C_{33}(x, t)$ – концентрация ЗВ в застойной зоне (г/дм³ воды), $a(x, t)$ – концентрация ЗВ в сорбенте (г/дм³ слоя фильтра), $f^{-1}(a)$ – функция, обратная изотерме сорбции ЗВ на сорбенте, β_1, β_2 – кинетические коэффициенты массопереноса между проточной и застойной зонами и застойной зоной и сорбентом соответственно (с⁻¹).

Для оценки величины кинетического коэффициента β_1 можно воспользоваться формулой

$$\beta_2 = \alpha D_{ж} / \Delta_2, \quad (1.2)$$

где $D_{ж}$ – коэффициент молекулярной диффузии ЗВ жидкости, см²/с; Δ_2 – характерный размер каждой из зон, см; α – численный коэффициент, учитывающий форму зон.

Суммарный путь диффузии Δs при наличии двух зон будет равен

$$\Delta s = \Delta_1 + \Delta_2. \quad (1.3)$$

Величина коэффициента внешней диффузии при сплошном течении жидкости для зернистого слоя (средний размер частиц сферической формы d , см) рассчитывается по формуле:

$$\beta = 0,009v^{0.5}d^{-1.5}, \quad (1.4)$$

где β – коэффициент внешней диффузии (с-1), d – средний размер частиц загрузки (см), v – средняя скорость тока жидкости, рассчитанная как отношение расхода к площади сечения фильтра (см/с). В формуле (1.3) средний путь диффузии оценивается по формулам (1.2) и (1.4), то есть имеет значение порядок размера зерен.

В случае капельного орошения фильтра внутри порового пространства формируется пленочное течение жидкости по поверхности зерен, то есть внутри порового слоя имеется трехфазная система: зерна загрузки, воздушные зоны и пленочное течение воды по поверхности зерен.

При таком течении значительно уменьшается расстояние диффузии ЗВ к поверхности фильтра. Толщина этого диффузионного слоя Δ_n зависит от расхода воды. Ее величину можно оценить по отношению расхода воды при сплошном течении к расходу воды при дождевании. Минимальная оценка при этом составляет порядок. Следовательно, из формулы (1.3) находим, что диффузионный путь при дождевании по крайней мере на порядок меньше, чем при струйном течении. Следовательно, на порядок возрастает величина коэффициента внешней диффузии β .

3. Для ряда загрязняющих веществ, например нефтепродуктов, изотерма сорбции на лиофильных сорбентах является прямоугольной. Модель (1) трансформируется в систему вида:

$$\partial a / \partial t = \beta(a)C, \quad (1.5)$$

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

$$\beta(a) = \{\beta_0 \text{ при } a < a_0, 0 \text{ при } a = a_0\}. \quad (1.6)$$

Тогда решение задачи динамики сорбции имеет вид:

$$\begin{aligned} U(X, T) &= \exp(-X), \quad q(X, T) = T \exp(-X) \\ &\text{при } 0 \leq T \leq 1, \\ U(X, T) &= q(X, T) = \exp(-X + T - 1) \\ &\text{при } 1 \leq T \leq 1 + X, \\ U(X, T) &= q(X, T) = 1 \\ &\text{при } T \geq 1 + X, \end{aligned} \quad (1.7)$$

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

$$X = \beta x / v, \quad T = \beta t / \Gamma, \quad (1.7a)$$

где β – коэффициент внешней диффузии (в пленке или суммарный по застойной и проточной зонам), коэффициент распределения равен отношению емкости фильтра a_0 к входной концентрации ЗВ C_0 :

$$\Gamma = a_0 / C_0.$$

Время защитного действия t_{np} (с) определяется по формуле:

$$t_{np} = \Gamma / v l + \Gamma / \beta (1 + 2,31 \lg C_n / C_0), \quad (1.8)$$

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

Для выбранного сорбента время защитного действия равно сумме двух слагаемых в (1.8). Первое слагаемое в основном определяется емкостью сорбента. Второе слагаемое главным образом зависит от кинетики процесса. Поэтому при прочих неизменных условиях фильтрования изменение режима вызывает пропорциональное изменение второго слагаемого в формуле (1.8).

Для обоих вариантов фильтрации выражение в круглых скобках одинаково. Однако коэффициент β обратно пропорционален толщине диффузионного слоя. Для пленочной фильтрации эта величина примерно на порядок меньше, чем при традиционной фильтрации с заполнением водой всего объема порового слоя. Во столько же раз возрастет и время защитного действия. Происходит также пропорциональное увеличение t_{np} для водовоздушной фильтрации за счет первого слагаемого вследствие уменьшения скорости U .

Таким образом, водовоздушная фильтрация имеет бесспорные преимущества перед традиционной однофазной, вытекающие из значительного улучшения кинетики массопереноса.

ВЛИЯНИЕ ПРЕРЫВИСТОГО РЕЖИМА ВОДОВОЗДУШНОГО ФИЛЬТРОВАНИЯ НА ЭФФЕКТ АДСОРБЦИИ

Фильтрующий материал является гидрофобным и лиофильным, что обеспечивает прилипание загрязняющих частиц нефтемаслопродуктов (НМП) к поверхности частиц. При наличии сплошного потока воды, загрязненной НМП, молекулы воды препятствуют действию межмолекулярных сил в направлении расширения пятен НМП на поверхности загрузки.

При пульсационном режиме происходит стекание воды, а прилипшие частицы НМП остаются в слое, поскольку силы межмолекулярного взаимодействия зерен с НМП намного больше, чем с водой.

Этот эффект различия сил молекулярного взаимодействия воды и НМП способствует расширению пятен НМП на поверхности частиц загрузки в отсутствие тока воды. Тем самым увеличивается емкость фильтра. Очевидно, что чем больше продолжительность паузы, тем меньшее количество воды остается на поверхности сорбента, тем меньше сопротивление молекул воды расширению пятен НМП и тем выше емкость.

Некоторую аналогию этому процессу мы находим в работе [3]. В ней приводится график зависимости эффективности удаления аммония от времени аэрации фильтра. Автором для изучения влияния аэрации на повышение эффективности развития нитрифицирующего бактериоценоза использовалась модель

$$u \frac{dC_2}{dl} = -\frac{k_2 C_2 B_1}{K_2 + C_2} - \frac{k_5 C_2 C B_1}{(K_5 + C_2)(K_0 + C)}, \quad (2.1.)$$

где $C_2(l)$ – концентрация NH_4 ; C – концентрация кислорода в воде; B_1 – концентрация нитрификаторов, u – скорость фильтрации в слое, l – координата по длине фильтра; k_i , K_j – константы.

В этом уравнении эффективность работы фильтра обеспечивается в том числе концентрацией нитрификаторов B_1 , которая входит в уравнение (2.1) в виде линейного члена. Аэрация способствует увеличению концентрации B_1 , и это единственный фактор, на который влияет аэрация.

В нашем случае механизм увеличения емкости фильтра на стадии паузы в фильтровании аналогичен описанному выше механизму возрастания концентрации нитрификаторов. Нами предложена следующая модель роста емкости фильтра при высушивании:

$$da_0/dt = a_{0\max} - \gamma a_0, \quad (2.2)$$

где $a_0(t)$ – емкость фильтра в данный момент фильтрации (при фильтрации только водовоздушной смеси без аэрации – величина постоянная), $a_{0\max}$ – максимально достижимая емкость фильтра для набора НМП данной загрузки, γ –

кинетический коэффициент повышения емкости загрузки при аэрации.

В начальный момент $t = 0$ емкость фильтра равна $a_{0н}$. И при аэрации она растет, подчиняясь уравнению (2.2), причем отсчитывается только время аэрации. Решение уравнения имеет вид:

$$a_0(t) = a_{0\max} - (a_{0\max} - a_0) \exp(-\gamma t).$$

В нашем случае аэрация способствует повышению емкости фильтра, и эта зависимость реализуется через уравнение кинетики (1.5). При аэрации происходит увеличение емкости a_0 , и этот эффект воздействует на рост эффективности фильтрования.

МОДЕЛЬ ОЧИСТКИ ВОДЫ НА МНОГОСЕКЦИОННОМ «СУХОМ» ФИЛЬТРЕ

Обозначим время защитного действия односекционного фильтра через t_{30} .

Сравним его эффективность с многосекционным (число секций – n). На рис. 3 представлена процедура смены секций после достижения времени защитного действия t_{30} (первая сорбция происходит на чистом слое).



Рис. 3. Смена отработанной секции при достижении времени защитного действия t_{30} :

а – распределение загрязнения по слою в момент t_{30} ;
б – удаление наиболее загрязненной секции и дополнение чистой секции в хвостовой части

Очистка идет в частично загрязненном слое.

Дает ли эффект посекционная смена фильтрующего слоя? Будем вести сравнение двух вариантов.

Вариант 1. Меняем фильтр полностью. Тогда время защитного действия то же – t_{31} .

Вариант 2. Заменяем секцию (объем V/n). При смене n секций полностью обновим первоначальный фильтр. Суммарное время защитного действия то же t_{32} .

Будет ли время защитного действия t_{32} в результате полной замены всех секций (то есть при последовательной смене n секций) на фильтре меньше или больше времени защитного действия при полной смене загрязненного фильтра свежим t_{31} ?

Сначала рассмотрим решение задачи динамики сорбции на секционном фильтре. Принимаем модель (1.6).

Рассмотрим последовательно этапы замены секций.

Этап 1.

Фильтрация на чистом слое.

В качестве модели выбираем систему (1.6) в безразмерных переменных:

$$-\partial u / \partial X = \partial q / \partial T = \{u \text{ при } q < 1; 0 \text{ при } q = 1\}, \quad (3.1)$$

где $u = C/C_0$, $q = a/a_0$ – безразмерные концентрации загрязняющего вещества в растворе и осадке соответственно, $X = \beta x/v$, $T = \beta t/\Gamma$ – безразмерные длина и время. Начальные и граничные условия:

$$u(X, 0) = \exp(-X); q(X, 0) = 0, u(0, T) = 1.$$

Решение имеет вид (1.7). Нас интересует поведение выходной кривой $u(X, T)$ при X_0 . Оно состоит из двух участков:

$$\begin{aligned} u(X_0, T) &= \exp(-X_0) \text{ при } 0 \leq T \leq 1, \\ u(X_0, T) &= \exp(-X_0 + T - 1) \text{ при } 1 \leq T \leq 1 + X_0; \\ u(X_0, T) &= 0 \text{ при } T \geq 1 + X_0. \end{aligned}$$

На начальном участке ($T \leq 1$) выходная кривая – постоянная концентрация $\exp(-X_0)$. Длину фильтра следует выбирать из условия:

$$\exp(-X_0) \ll u_n, \quad (3.2)$$

то есть меньше заданной нормативной концентрации в фильтрате. При $T > 1$ концентрация в выходном сечении фильтра будет возрастать по формуле:

$$u(X_0, T) = \exp(-X_0 + T - 1) \text{ при } T > 1 \quad (3.3)$$

или $u(X, T) = u_n \exp(T - 1)$.

Время защитного действия следует из (4.3.3.3). В момент $T = T_n$ достигается концентрация u_n

$$T_n = X_0 + 1 + \ln u_n. \quad (3.4)$$

Назовем это время временем защитного действия чистого фильтра. Размерное время защитного действия чистого фильтра равно:

$$t_{z1} = \Gamma T_n / \beta, \quad (3.5)$$

то есть тем больше, чем больше коэффициент распределения (емкость фильтра) и чем меньше кинетический коэффициент β . Распределение осадка по слою в этот момент представлено на рис. 4.

Определим толщину лобового слоя Δ , где произошла отработка слоя в момент проскока T_n . Подставив (3.4) в решение (1.7), получим:

$$\Delta = X_0 + \ln u_n. \quad (3.6)$$

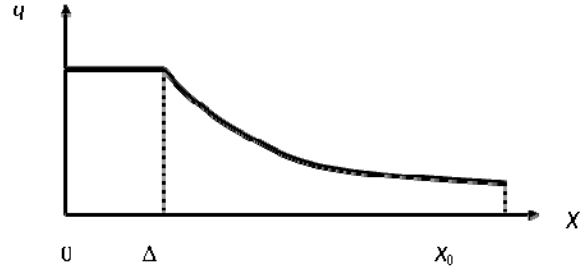


Рис. 4. Распределение осадка по слою фильтра в момент проскока T_n

Толщина лобового слоя меньше X_0 , так как $\ln u_n < 0$. Кроме того, из (3.4) следует:

$$T_n = \Delta + 1. \quad (3.4a)$$

В момент остановки фильтра на перезагрузку распределение концентрации осадка дается уравнением:

$$q(X, T_n) = 1 \text{ для } X < \Delta, q(X, T_n) = \exp(-X + \Delta) \text{ для } X_0 > X \geq \Delta. \quad (3.7)$$

Далее лобовой слой Δ удаляется, а в хвостовую часть фильтра досыпается чистая загрузка. Распределение представлено на рис. 5.

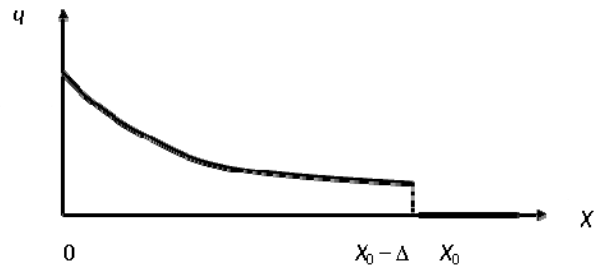


Рис. 5. Распределение осадка по слою фильтра в момент перезагрузки

Этап 2.

Далее вновь начинается фильтрация на слое, имеющем распределение, представленное на рис. 4.3.5. Решение исходной системы (3.1) ведется при частично отработанном слое. Распределение осадка выражается:

$$q(X, 0) = \{ \exp(-X) \text{ для } X_0 - \Delta > X \geq 0, \\ 0 \text{ для } X_0 - \Delta \leq X \leq X_0 \}.$$

Решение этой задачи в момент проскока (когда на выходе достигается проскоковая концентрация u_n) определяется выражением:

$$\begin{aligned} q(X, T) &= \{ 1 \text{ при } 0 \leq T \leq X \leq \Delta; \\ q(X, T) &= \exp(-X + T) \text{ при } T < \Delta \text{ и } T \leq X \leq X_0 - \Delta; \\ q(X, T) &= \exp(-X)(\exp(T) - 1) \text{ при } X_0 - \Delta \leq X \leq X_0, \end{aligned} \quad (3.8)$$

которое для момента $T_{п,2}$ (см. далее) представлено графически на рис. 6.

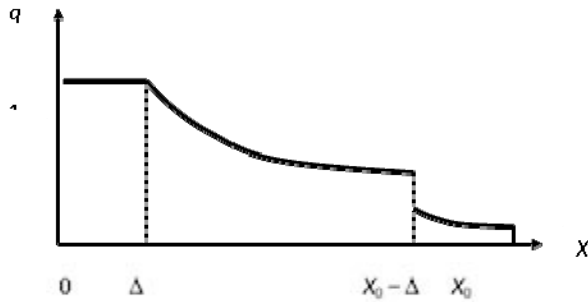


Рис. 6. Распределение осадка по слою фильтра в момент проскока после перегрузки

Из решения (3.8) следует, что проскок также наступает в момент времени $T_{п,2} = \Delta$, когда концентрация ЗВ в выходном сечении будет равна u_n . В этот момент времени распределение осадка по слою дается выражением:

$$\begin{aligned} q(X, T_{п,2}) &= \{1 \text{ при } 0 \leq X \leq \Delta; \\ q(X, T_{п,2}) &= \exp(-X + \Delta) \text{ при } \Delta < X \leq X_0 - \Delta; \\ q(X, T_{п,2}) &= \exp(-X)(\exp(\Delta) - \exp(-\Delta)) \\ &\text{при } X_0 - \Delta \leq X \leq X_0\}. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Обратим внимание на важную особенность решения. Вновь при проскоке, как и на первоначально полностью чистом фильтре, обрабатывается лобовой слой длины Δ . Время работы этого фильтра до проскока при каждой перегрузке равно Δ :

$$T_{п,i} = \Delta.$$

Далее процедура продолжается: изымается лобовой слой Δ и добавляется чистая загрузка в конце фильтра (см. рис. 7). При решении оказывается, что и время $T_{п,3}$ до проскока u_n также равно Δ . Также обрабатывается лобовой слой толщины Δ .

При повторении указанной процедуры общее число таких перегрузок должно равняться

$$X_0/\Delta \approx n.$$

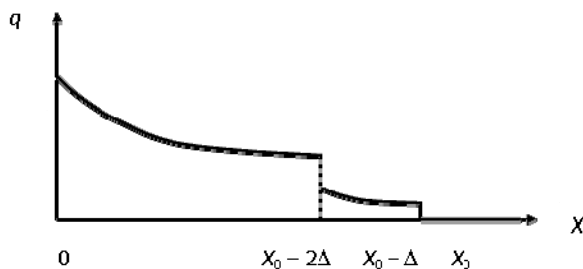


Рис. 7. Распределение осадка по слою фильтра в момент второй перегрузки

Таким образом, если толщина отработанного слоя Δ равна X_0/n , то до полной смены слоя потребуется n замен отработанных слоев, так что для полного времени защитного действия в варианте 2 потребуется время

$$T_{32} = X_0. \quad (3.10)$$

Сравним это время с временем защитного действия на первоначально полностью чистом фильтре, которое равно

$$T_{31} = \Delta + 1. \quad (3.4a)$$

Следовательно, проверяем неравенство:

$$T_{31} = 1 + X_0/n < X_0 = T_{32}.$$

Это неравенство эквивалентно следующему

$$T_{32} = X_0 > 1/(1 - 1/n). \quad (3.11)$$

Но это условие заведомо выполняется вследствие требования

$$\exp(-X_0) \ll u_n, \quad (3.12)$$

когда выбирается длина слоя с достаточно глубокой степенью очистки, так как если $X_0 \approx 1$, то проскоковая концентрация $\exp(-X_0) \approx \exp(-1) = 0,36$, что заведомо неприемлемо. Даже в самом крайнем случае $n \approx 2$ условие (3.11) имеет вид:

$$X_0 > 2.$$

В этом случае проскоковая концентрация 0,13, что, как правило, неприемлемо для нее.

Оценим для реальных случаев характерные размеры слоев фильтра.

В заключение сделаем вывод о наиболее эффективном числе секций. Из формулы (3.11) следует, что наиболее значительный выигрыш по времени защитного действия будет при большем числе секций n . Однако здесь ограничителем будут производственные условия.

Важно подчеркнуть, что даже две секции дают выигрыш по времени защитного действия в пользу секционного фильтра.

По результатам исследования математической модели секционного фильтра для инженерных нужд разработана расчетная программа. Программа позволяет выбирать необходимое число секций и время защитного действия сорбционной загрузки, исходя из емкости фильтра, концентрации нефтепродуктов в исходной воде и требуемого эффекта очистки (в разработке программы принял участие кандидат технических наук А. С. Селиванов).

В качестве среды разработки использовалась популярная система визуального программирования Windows – Borland C++ Builder 6.0. Эта система обеспечивает удобную и естественную

среду разработки, поддержку различных C и C++ компиляторов и отладчиков.

Исследование построенной математической модели секционного фильтрования указывает на то, что по мере увеличения числа секций растет выигрыш по времени защитного действия загрузки фильтра.

На практике число секций фильтра ограничивается реальными конструктивными возможностями. Так, на построенных нами объектах удачными оказывались конструкции фильтров с 4–6 секциями.

В общем случае задача поиска оптимального числа секций фильтра требует аналитического описания целевой функции. Такая функция должна отражать приведенные затраты на строительство и эксплуатацию очистных сооружений. Построение целевой функции является само по себе сложной задачей и требует детального изучения различных производственных факторов. Так, в докторской диссертации Р. И. Аюкаева [2] для решения оптимизационных задач при конструировании зернистых фильтров с новыми фильтрующими материалами были «переработаны» с десятков типовых проектов фильтровальных станций, проанализированы эксплуатационные затраты на действующих водоочистных сооружениях Куйбышева, Тольятти, Набережных Челнов, Петрозаводска.

Задачу окончательного выбора можно вынести за скобки моделирования и оставить право выбора окончательного варианта за инженером. В этом случае исходными данными для такого выбора могут стать зависимости высоты слоя загрузки фильтра от числа секций, времени защитного действия одной секции от общего числа секций (с последующим усложнением задачи).

Для определения данных параметров в разработанной программе используется следующий алгоритм. На первом этапе задается число секций

фильтра n . При известной эффективности очистки \mathcal{E} и входной концентрации C_0 нефтепродуктов вычисляется концентрация нефтепродуктов на выходе

$$C = C_0 - \mathcal{E} \times C_0 \text{ и величина } u = \frac{C}{C_0}.$$

Исходя из соотношения $\Delta = X_0 + \ln u$, где Δ – безразмерная толщина лобового слоя, X_0 – безразмерная толщина фильтра, определяется безразмерная толщина фильтра (при этом учитывается, что $\Delta = \frac{X_0}{n}$). Безразмерное время до про-

скока составляет $T_n = \Delta = \frac{X_0}{n}$. Для перехода к размерным величинам необходимо определить кинетический коэффициент β . В разработанной программе для кинетического коэффициента используется соотношение (1.4).

Переход к размерной длине осуществляется по формуле $x = \frac{X_0}{\beta} \times v$, для размерного времени

$$t = \frac{\Gamma}{\beta} \times T_n, \text{ где } \Gamma - \text{коэффициент распределения,}$$

равный отношению емкости фильтра к входной концентрации нефтепродуктов.

При проведении расчетов количество секций варьируется от 2 до 7. По каждому варианту рассчитывается необходимая толщина фильтрующего слоя и время защитного действия для каждой секции.

Право выбора конкретного варианта (определение числа секций фильтра) остается за инженером.

Результаты расчета для одного из контрольных примеров представлены на рис. 8.

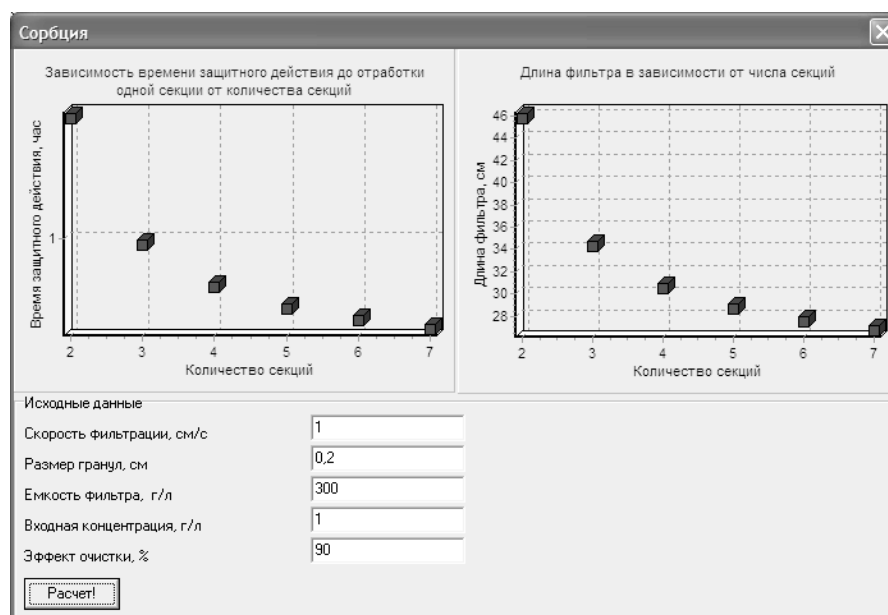


Рис. 8. Результаты расчета сорбционного фильтра для контрольного примера

Проведены полупромышленные и промышленные испытания «сухого» фильтра. Так, многокассетный фильтр «сухого» фильтрования включен по нашим рекомендациям в состав основного водоочистного оборудования оборотной системы водоснабжения загородной АЗС в пригороде Медвежьегорска. Сооружения построены и после проведения пусконаладочных работ пущены в штатную эксплуатацию. Заказчик был предупрежден об опытном характере предложенной технологии, принял ее и способствовал проведению наблюдений за работой сооружений.

Полупромышленные испытания проведены в рамках пусконаладочных работ, что позволило несколько расширить финансовые возможности по объему и количеству контролируемых параметров. Пятикассетный фильтр был загружен: первая – четвертая кассеты – плитами из модифицированного торфа; пятая кассета – минеральным сорбентом «Новосорб». Контролировались расход стоков, качество исходной и очищенной воды по ступеням очистки по взвешенным веществам, нефтепродуктам. Результаты анализов по характерному опыту представлены в таблице.

Показатели работы пятисекционного «сухого» фильтра на АЗС в пригороде Медвежьегорска

Показатели загрязнений, мг/л	Точки отбора проб стоков на анализ					
	исходная	1	2	3	4	5
Взвешенные вещества	60.0	35.0	20.0	11.0	6.0	2.5
Нефтепродукты	24.0	20.0	6.0	3.0	2.0	0.7

Вследствие трудоемкости и дороговизны анализов стоков в динамике удалось организовать анализ незначительного количества проб на содержание нефтепродуктов.

По результатам пусконаладки сооружений разработана исполнительная документация, составлены нормативные акты по передаче построенных сооружений в штатную эксплуатацию, обучен штатный оператор.

ВЫВОДЫ

1. Анализ работ по ионно-каталитическому методу обезжелезивания подземных вод и биологическому методу удаления загрязнений азотной группы из хозяйственно-бытовых и близких к ним по составу сточных вод на зернистых фильтрах «сухого» фильтрования показал перспективность их применения для конструирования «редкообслуживаемых» водоочистных установок для использования на водоочистных сооружениях загородного размещения.
2. Анализ предлагаемых на рынке сорбционных материалов отечественного и иностранного производства показал перспективность использования для «сухих» фильтров местного материала – модифицированного торфа.
3. Обосновано феноменологическое, гидродинамическое и массообменное объяснение эффекта «сухого» фильтрования в сорбционных и биологических методах разделения растворов и суспензий.
4. Разработанная и исследованная математическая модель, блок-схема и программа расчета «сухих» фильтров подтверждают полученные экспериментально кинетическими зависимостями изъятия нефтепродуктов и соединений азота.
5. Многокассетный «сухой» фильтр с использованием органического (торфоплиты) и минерального («Новосорб») сорбентов обеспечивает простое в устройстве, эксплуатации и сервисном обслуживании, с высоким очищающим и доочищающим эффектом сооружение для объектов загородного размещения.
6. По рекомендациям и при участии авторов запроектированы, построены, переданы в штатную эксплуатацию и находятся на консультативном сервисном обслуживании очистные сооружения для загородной автомойки (оборотная вода), загородной базы отдыха (дождевой сток) и загородного промышленного предприятия пищевого профиля (смесь производственного и хозяйственного стока).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асс Г. Ю., Трубецкой Б. Е., Гандельман А. А., Широков Г. М., Иргис Ю. Я. Обезжелезивание воды методом аэрофильтрации // Вода и санитарная техника. 1985.
2. Аюкаев Р. И. Теоретическое обобщение и промышленный опыт интенсификации работы водоочистных фильтров с высокопористыми материалами: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1981. 43 с.
3. Голубев В. С., Веницианов Е. В., Гарибянц А. А. Уравнения гидродинамической дисперсии и динамики сорбции для пористой среды с застойными зонами // Теоретические основы химической технологии. М., 1980. Т. 14. № 4. С. 607–610.
4. Графова Е. О. Повышение эффективности работы систем водоснабжения и водоотведения загородных объектов: Дис. ... канд. техн. наук. СПб.: СПбГАСУ, 2008. 148 с.
5. Залетова Н. А. Очистка городских сточных вод от биогенных веществ (соединений азота и фосфора): Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М.: НИИ КВОВ, 1999. 50 с.
6. Хаппель Дж., Бернер Г. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса. М.: Мир, 1976. 635 с.