

УДК 626.16.067

БЕЗРЕАГЕНТНАЯ ОЧИСТКА ВОДЫ ФИЛЬТРАМИ ИЗ ВОЛОКНИСТО-ПОРИСТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

Н. Г. БУГАЙ, А. И. КРИВОНОГ, В. В. КРИВОНОГ

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

Получено 15.01.2004

Приведены результаты экспериментальных исследований осветления малоконцентрированной тонкодисперсной суспензии фильтрами из волокнисто-пористого полиэтилена (ВПП). Показано, что фильтры ВПП могут очищать воду не хуже, чем традиционные зернистые фильтры. При этом грязеемкость и продолжительность фильтроцикла для фильтров ВПП больше. Предлагается новая методика обработки результатов экспериментов с использованием безразмерного времени, которое представляет собой отношение объема профильтрованной суспензии к объему фильтра. Получены расчетные формулы и графики для расчета фильтра. Экспериментально определена действительная пористость фильтра в процессе его заиливания, степень заполнения пор осадком, плотность осадка и предельное заиливание фильтра. Рассмотрена модель ламинарной фильтрации через капиллярно-пористое тело и сопоставлена с экспериментом. Показано, что гипотеза равномерного распределения осадка вокруг волокон подтверждается только в начале процесса при незначительном заиливании фильтра. Разработан способ регенерации фильтра без нарушения его структуры.

Наведені результати експериментальних досліджень освітлення малоконцентрованої тонкодисперсної суспензії фільтрами з волокнисто-пористого поліетилену (ВПП). Показано, що фільтри ВПП можуть очищувати воду не гірше, ніж традиційні зернисті фільтри. При цьому грязеемкість і тривалість фільтроциклу для фільтрів ВПП більша. Пропонується нова методика обробки результатів експериментів з використанням безрозмірного часу, що являє собою відношення об'єму суспензії, що профільтрувалася, до об'єму фільтра. Отримано розрахункові формули і графіки для розрахунку фільтра. Експериментально визначена дійсна пористість фільтра під час його замулення, ступінь заповнення пор осадком, щільність осаду і граничне замулення фільтра. Розглянуто модель ламинарної фільтрації через капілярно-пористе тіло, яка в свою чергу зіставлена з експериментом. Показано, що гіпотеза рівномірного розподілу осаду навколо волокон підтверджується тільки на початку процесу при незначному замуленні фільтра. Розроблено спосіб регенерації фільтра без порушення його структури.

The results of experimental researches of a purification small-concentratic thin-dispersed of suspension by filters from fibrous-porous polyethylene (FPP) are reduced. It was rotined, that the filters FPP can purify the water not worse, than applied granulated filters do. Moreover sludge-capacity and duration of filter-circuit for filters FPP are more. New method of processing of results of experiments with usage of dimensionless time, which represents the ratio of volume of the filtered suspension to volume of the filter is offered. The calculated formulas and plots for calculation of the filters are obtained. Real porosity of the filters during it is accumulation of sludge, degree of fullness of pores by a sediment, density of sediment and limiting accumulation of sludge of the filter experimentally are determined. Model of laminar filtering through a capillary-porosity body is reviewed and is compared to experiment. It was rotined, that the hypothesis of a uniform distribution of sediment around the fibres verified only in the onset of the process with a insignificant accumulation of sludge of the filter. The method of regeneration of the filter without disturbance of its structure is designed.

ВВЕДЕНИЕ

Проведенные нами ранее исследования безреагентной очистки воды [8, 9, 11, 14], замутненной механическими частицами диаметром менее 10 мкм при массовой концентрации до 600 мг/л, показали, что очистка воды до 2 ÷ 3 мг/л фильтром из волокнисто-пористого полиэтилена (ВПП) возможна не хуже, чем фильтрами из песка или пенополистирола (ППС). При этом, при всех прочих равных условиях, продолжительность фильтроцикла и грязеемкость при использовании ВПП больше. Однако в этих исследованиях не был решен вопрос о регенерации фильтров ВПП. Поэтому в 2001 – 2003 гг. проведены более детальные исследования, результаты которых приведены ниже.

Был разработан метод регенерации фильтров ВПП, определены действительные значения пористости фильтра и плотности осадка, а также средние скорости движения суспензии в порах, изучены особенности кинетики и гидродинамики фильтрования. При обработке экспериментов использованы зависимости, составленные с учетом безразмерного времени.

Актуальность проведенных исследований определяется тем, что на основе фильтров ВПП можно создать простые и эффективные аппараты очистки воды для индивидуальных потребителей или небольших населенных пунктов. Методы исследования кинетики фильтрования, разработанные нами, могут быть использованы при реагентной очистке и обезжелезивании воды.

**1. КИНЕТИКА ОСВЕЩЕНИЯ.
ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

Фильтр ВПП получен термоэкструзионным способом и состоит из волокон, длина которых значительно больше диаметра. Волокна расположены в плоскости фильтра и их диаметр изменяется мало, так что можно говорить о среднем диаметре волокон $d_{\text{в.в.}}$. Пористость ВПП примерно в два раза больше пористости зернистых фильтров [8].

При обработке результатов экспериментов по кинетике осветления суспензии использованы зависимости, приведенные ниже.

Рассмотрим фильтр диаметром D , толщиной δ , массовой плотностью фильтра γ и материала волокон $\gamma_{\text{в}}$. Скорость фильтрования $V = \text{const}$, концентрация суспензии перед фильтром $C_0 \approx \text{const}$, концентрация на выходе из фильтра C , $C_0 - C = \Delta C$. Пористость фильтра n и общую длину волокон в фильтре $L_{\text{в}}$ найдем по формулам

$$n = \frac{\gamma_{\text{в}} - \gamma}{\gamma_{\text{в}}}, \quad (1)$$

$$L_{\text{в}} = \frac{D^2 \cdot \delta \cdot (1 - n)}{d_{\text{в.в.}}^2}. \quad (2)$$

При испытании фильтра обычно получают зависимость $C = f(t)$, где t – время. За время Δt концентрация суспензии изменится на ΔC , а масса осадка в фильтре – на ΔM :

$$\Delta M = \frac{\pi D^2}{4} \cdot V \cdot \Delta t \cdot \Delta C. \quad (3)$$

Из соотношения (3) можно получить коэффициент заиления фильтра σ_s , который представляет собой массовое заиление фильтра, отнесенное на единицу площади поверхности волокон чистого фильтра за единицу времени, и приведенный коэффициент заиления σ_s'' :

$$\sigma_s = \frac{V \cdot d_{\text{в.в.}} \cdot \Delta C}{4\delta(1 - n)}, \quad (4)$$

$$\sigma_s'' = \frac{4\sigma_s \cdot \delta \cdot (1 - n)}{C_0 \cdot V \cdot d_{\text{в.в.}}} = \frac{\Delta C}{C_0}. \quad (5)$$

Аналогичным образом можно определить коэффициент заиления σ_w , который представляет собой массовое заиление фильтра, отнесенное к единице объема пор фильтра за единицу времени и σ_w'' :

$$\sigma_w = \frac{V \cdot \Delta C}{\delta \cdot n}, \quad (6)$$

$$\sigma_w'' = \frac{\sigma_w \cdot \delta \cdot n}{C_0 \cdot V} = \frac{\Delta C}{C_0}. \quad (7)$$

Если массовое заиление отнести к единице объема фильтра, то получим

$$\sigma_w = \frac{V \cdot \Delta C}{\delta}, \quad (8)$$

$$\sigma_w'' = \frac{\sigma_w \cdot \delta}{C_0 \cdot V} = \frac{\Delta C}{C_0}. \quad (9)$$

При фильтровании суспензии с $V = \text{const}$ для определенного фильтра ($d_{\text{в.в.}}$, δ и n – постоянные величины) фильтроцикл можно разделить по времени t на три периода: период зарядки фильтра, когда ΔC возрастает от 0 до некоторого значения; период "автомодельного режима", когда $\Delta C \approx \text{const}$, и период нарушения "автомодельного режима", когда ΔC быстро убывает, а C возрастает.

Если разделить ΔM в выражении (3) на объем пор фильтра $\frac{\pi D^2}{4} \cdot \delta \cdot n$, то получим ΔG – изменение удельного массового заиления пор фильтра за время Δt :

$$\Delta G = \frac{V \cdot \Delta C}{\delta \cdot n} \cdot \Delta t = \sigma_w \cdot \Delta t. \quad (10)$$

В "автомодельном режиме" $\Delta C \approx \text{const}$, $\Delta G = G_{\text{кр.2}} - G_{\text{кр.1}}$, $\Delta t = t_2 - t_1$, где индексы 1 и 2 обозначают начало и конец "автомодельного режима",

$$G_{\text{кр.2}} - G_{\text{кр.1}} = \frac{V \cdot \Delta C}{\delta \cdot n} \cdot (t_2 - t_1) = \sigma_w \cdot (t_2 - t_1). \quad (11)$$

Введем безразмерное время T следующим образом:

$$T = \frac{t}{t_0}, \quad (12)$$

где $t_0 = \frac{\delta}{V}$ – время, за которое условный фронт суспензии проходит фильтр толщиной δ со скоростью V .

Если в формуле (12) умножить числитель и знаменатель на $\frac{\pi D^2}{4} \cdot V$, то получим

$$T = \frac{t \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot V}{t_0 \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot V}, \quad (13)$$

где в числителе – объем профильтровавшейся суспензии, в знаменателе – объем фильтра. Видно,

что при использовании времени T мы связываем изменение параметров фильтрования не с реальным временем, а с объемом суспензии и объемом фильтра. Физически это правильно, так как объем осветленной суспензии определяет заиливание фильтра, а не время t .

Тогда выражение (11) можно записать так:

$$G_{кр.2} - G_{кр.1} = \frac{\Delta C}{n}(T_2 - T_1). \quad (14)$$

Разделив левую и правую часть в (14) на C_0 , получим в безразмерных величинах:

$$\frac{G_{кр.2} - G_{кр.1}}{C_0} = \frac{\Delta C}{C_0 \cdot n}(T_2 - T_1). \quad (15)$$

При $G_{кр.1} \ll G_{кр.2}$ и $t_1 \ll t_2$ получим для "автомодельного режима":

$$G = \sigma_w \cdot t, \quad (16)$$

$$G' = \frac{G}{C_0} = \frac{\Delta C}{C_0 \cdot n} T, \quad (17)$$

$$G' \cdot n = \frac{\Delta C}{C_0} T, \quad (18)$$

где G' – приведенное удельное заиливание единицы объема пор фильтра; $G' \cdot n$ – то же, единицы объема фильтра.

Из соотношения (18) видно, что при работе фильтра в "автомодельном режиме" зависимость $G' \cdot n - T$ представляет собой пучок прямых линий-лучей. Угловой коэффициент каждого луча будет определяться $\Delta C/C_0$, который представляет собой степень очистки суспензии, численно равный σ_w'' .

При описании механизма осветления суспензии принимаем следующую гипотезу. Механические частички суспензии при прохождении через фильтр захватываются волокнами равномерно, диаметр волокон увеличивается и становится $d_{э.в.э.} > d_{э.в.}$. Вследствие этого пористость фильтра уменьшается, а гидравлическое сопротивление фильтра возрастает. Учитывая формулы (1) и (2), получим пористость заиленного фильтра $n_{э.}$:

$$n_{э.} = 1 - (1 - n) \left(\frac{d_{э.в.э.}}{d_{э.в.}} \right)^2. \quad (19)$$

Зная $n_{э.}$, можно определить объем заиленного порового пространства фильтра $W_{ф.э.}$, среднюю скорость в порах u , концентрацию твердых частиц в осадке $C_{ос.}$, плотность осадка $\gamma_{ос.}$, степень заиления пор осадком ρ по следующим формулам:

$$W_{ф.э.} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \delta(n - n_{э.}), \quad (20)$$

$$u = \frac{V}{n_{э.}}, \quad (21)$$

$$C_{ос.} = G \frac{n}{(n - n_{э.})}, \quad (22)$$

$$\gamma_{ос.} = \gamma_w + \frac{C_{ос.}}{\gamma_T} (\gamma_T - \gamma_w), \quad (23)$$

$$\rho = \frac{n - n_{э.}}{n}, \quad (24)$$

где $n_{э.}$ – активная пористость фильтра; γ_w и γ_T – плотность воды и твердых частиц суспензии соответственно. При $\gamma_w = 1.0$ г/см³ и $\gamma_T = 2.6$ г/см³, $\gamma_{ос.} = 1 + 0.61C_{ос.}$.

Так как $G = \rho \cdot C_{ос.}$, получим следующие зависимости в безразмерных величинах:

$$\rho = \frac{\Delta C}{C_0 \cdot n \cdot C'_{ос.}} \cdot T, \quad (25)$$

$$C'_{ос.} = \frac{\Delta C}{C_0 \cdot n \cdot \rho} \cdot T, \quad (26)$$

где $C'_{ос.} = \frac{C_{ос.}}{C_0}$.

Приведенные выше зависимости использованы при обработке результатов опытов.

2. ГИДРОДИНАМИКА ФИЛЬТРОВАНИЯ МАЛОКОНЦЕНТРИРОВАННОЙ СУСПЕНЗИИ ФИЛЬТРАМИ ВПП

Проведенные ранее исследования [8] показали, что в фильтрах ВПП при $d_{э.в.} = 50 \div 150$ мкм линейный закон сопротивления сохраняется при скорости фильтрации $V \leq 60$ м/час. Фильтрование суспензии при очистке воды проводят обычно при V не более $7 \div 10$ м/час. Поэтому можно считать, что во всех случаях в фильтрах ВПП будет сохраняться линейный закон сопротивления (фильтрация Дарси), при котором

$$V = K_{ф.э.} \frac{H}{\delta}, \quad (27)$$

где $K_{ф.э.}$ – коэффициент фильтрации частично заиленного фильтра; H – потери давления на фильтре в м. в. ст. Определение H в "автомодельном режиме" работы фильтра является целью гидравлического расчета фильтра и зависит от $K_{ф.э.}$. При этом, учитывая неодинаковое послойное заиливание фильтра, под $K_{ф.э.}$ следует понимать его

среднее значение для фильтра толщиной δ . В формулах (19) ÷ (26) неизвестными являются $d_{\text{э.в.э.}}$ и $n_{\text{э.}}$, которые невозможно определить без учета гидродинамики фильтра.

Рассмотрим следующую модель фильтрации. Принимаем, что фильтр ВПП представляет собой капиллярно-пористое тело и состоит из капилляров одинакового диаметра $d_k = 2r_k$ длиной δ , где r_k – радиус капилляра. Осредняя поровую структуру фильтра и принимая, что объем капилляров равен объему пор фильтра, получаем

$$N_k = \frac{1 \cdot 1 \cdot 16(1-n)^2}{\pi^2 \cdot d_{\text{э.в.}}^2}, \quad (28)$$

$$d_k = d_{\text{э.в.}} \frac{\sqrt{\pi \cdot n}}{2(1-n)}, \quad (29)$$

$$d_{k.э.} = d_{\text{э.в.}} \frac{\sqrt{\pi \cdot n_{\text{э.}}}}{2(1-n)}, \quad (30)$$

где N_k – количество капилляров на единицу площади фильтра; d_k и $d_{k.э.}$ – диаметр капилляра для чистого и заиленного фильтра соответственно.

Используя уравнение Пуазейля для ламинарного течения жидкости в капиллярах [8, 12, 16, 17], можно записать:

$$W = \frac{N_k \cdot \omega \cdot t \cdot \pi \cdot r_k^4 \cdot P}{8\eta \cdot \delta}, \quad (31)$$

где W – объем суспензии, профильтровавшейся через фильтр площадью ω за время t ; P – потери давления; η – вязкость суспензии.

Принимаем, что вязкость суспензии из-за малой концентрации не отличается от вязкости воды. Так как $W/\omega t = V$ – скорость фильтрации, $\eta = \nu \cdot \gamma_v$, (ν – коэффициент кинематической вязкости, γ_v – плотность воды), $P/(\gamma_v \cdot g) = H$, а также учитывая N_k по выражению (28) и что $V = K_{\text{ф}} \frac{H}{\delta}$, из (31) получаем

$$K_{\text{ф.э.}} = \frac{\pi \cdot g \cdot d_{\text{э.в.}}^2 \cdot n_{\text{э.}}^2}{128 \cdot \nu \cdot (1-n)^2}, \quad (32)$$

$$K_{\text{ф}} = \frac{\pi \cdot g \cdot d_{\text{э.в.}}^2 \cdot n^2}{128 \cdot \nu \cdot (1-n)^2}, \quad (33)$$

где $K_{\text{ф.э.}}$ и $K_{\text{ф}}$ – коэффициент фильтрации заиленного и чистого фильтра соответственно.

При исследовании фильтрации в волокнисто-пористых материалах нами было получено [8], что в формуле (33) необходимо учесть поправку на гидродинамическое взаимное влияние волокон в виде функции $f(n)$ для различных $d_{\text{э.в.}}$. Тогда формула (33) будет иметь следующий вид:

$$K_{\text{ф}} = \frac{\pi \cdot g \cdot d_{\text{э.в.}}^2 \cdot n^2}{128 \cdot \nu \cdot (1-n)^2 \cdot f(n)}. \quad (34)$$

Для определения $f(n)$ для чистого фильтра, пористость которого изменялась за счет деформации фильтра при сжатии, получены экспериментальные зависимости (рис. 1).

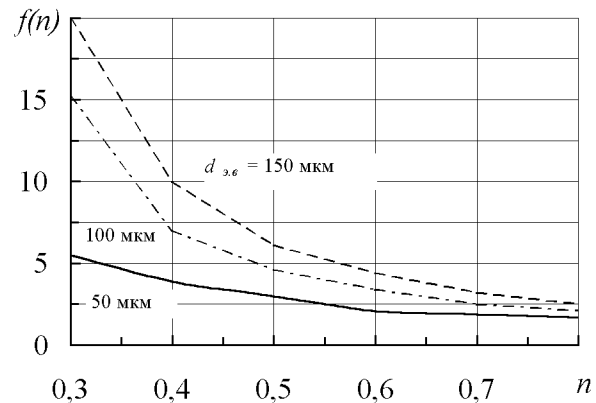


Рис. 1. Зависимости $f(n) = f(n, d_{\text{э.в.}})$

Принимая, что гидравлическое сопротивление чистого и заиленного фильтра при $n_{\text{э.}} = n$ одинаковое, можно записать

$$K_{\text{ф.э.}} = \frac{\pi \cdot g \cdot d_{\text{э.в.}}^2 \cdot n_{\text{э.}}^2}{128 \cdot \nu \cdot (1-n)^2 \cdot f(n_{\text{э.}})}, \quad (35)$$

где $f(n)$ находим по рис. 1 при $n_{\text{э.}} = n$. Расчет по формуле (35) проводим методом постепенных приближений. Насколько справедлива рассматриваемая модель будет показано ниже.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ ФИЛЬТРОВАНИЯ

3.1. Экспериментальная установка и методика исследований

На рис. 2 показана схема экспериментальной установки.

В режиме осветления установка работает следующим образом. Суспензия определенной мутности из водопроводной воды и замутнителя из бака 1 по трубопроводу 5 подается в напорный бак 6. В качестве замутнителя использовалась белая глина, из которой методом отстаивания удалены практически все частицы крупнее 10 мкм. Из напорного бака суспензия попадает в регулятор

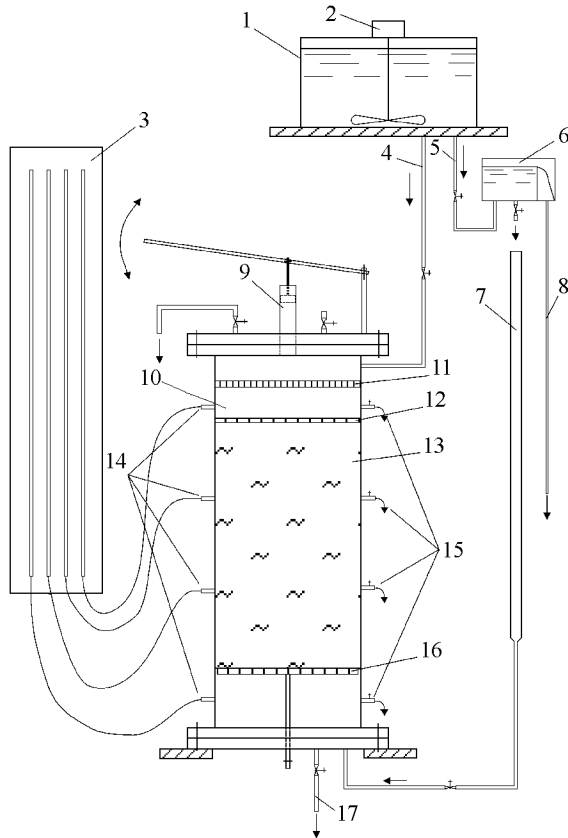


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

- 1 – бак для суспензии или промывочной воды; 2 – мешалка; 3 – пьезометрический щит; 4 – трубопровод промывочной воды; 5 – трубопровод для подачи суспензии в напорный бак; 6 – напорный бак постоянного уровня; 7 – регулятор скорости; 8 – переливной трубопровод; 9 – устройство для интенсификации промывки фильтрующей загрузки; 10 – фильтрационный прибор; 11 – распределительная система; 12 – опорная сетка; 13 – фильтрующая загрузка; 14 – пьезометры; 15 – пробоотборники; 16 – прижимное устройство; 17 – сбросной трубопровод

скорости 7, который позволяет поддерживать постоянную скорость фильтрования в течение всего опыта. После регулятора скорости суспензия попадает на фильтр (сверху или снизу) и, пройдя его, осветляется. В процессе опыта через определенные промежутки времени из пробоотборников 15 отбираются пробы суспензии для определения мутности с помощью фотометра ЛМФ-72М.1. Пробоотборники расположены равномерно по толщине фильтра через 10 см, а в некоторых опытах – через 5 см. Одновременно с отбором проб фиксируются показания пьезометров 14.

Большинство опытов продолжалось до нарушения "автомоделности", на которое указывало заметное увеличение мутности суспензии после фильтра. Некоторые опыты продолжались по-

сле нарушения "автомоделности" для оценки предельного заиливания фильтра. После этого проводилась промывка фильтра.

3.2. Результаты экспериментов

Эксперименты осуществлялись с фильтрами ВПП и параллельно с зернистыми фильтрами из песка и ППС. Фильтры из ВПП отличались по структуре: в опытах 1 – 5, 8 и 10 фильтр состоял из элементарных слоев толщиной $2 \div 3$ мм, в опытах 6, 7, 9, 11–15 – из элементарных слоев толщиной $(2 - 3)d_{0.в.}$. Толщина фильтра во всех опытах $\delta = 30$ см, скорость фильтрования $V = 0.75; 1.5$ и 3.0 м/ч, начальная концентрация $C_0 = 47 \div 640$ мг/л.

При обработке опытов, используя зависимости, приведенные выше, определяли $T, G, G', \sigma_w, \sigma_w'', K_\Phi$ и строили экспериментальные зависимости $G-t, \sigma_w-t, \sigma_w''-t, K_\Phi-t, K_\Phi-G, H-t$. На рис. 3 и 4 приведены эти экспериментальные зависимости для опыта 6.

Совместный анализ зависимостей $G-t, \sigma_w-t$ и $\sigma_w''-t$, позволяет определить $t_1, t_2, G_{кр.1}$ и $G_{кр.2}$ и соответствующие им значения $T_1, T_2, G'_{кр.1}$ и $G'_{кр.2}$. Результаты проведенных опытов при $\delta = 30$ см приведены в таблице, где $\downarrow \uparrow$ – направление фильтрации сверху вниз и снизу вверх соответственно.

3.3. Анализ результатов опытов

На графиках $\sigma_w''-t$ и $G-t$ в одних опытах довольно точно, а в других с небольшим допущением можно выделить три периода: период зарядки фильтра t_1 , "автомоделный режим" (t_1-t_2) и период $t > t_2$, когда нарушается "автомоделный режим" и σ_w'' уменьшается, а линейность $G-t$ нарушается.

Во всех опытах с фильтрами ВПП $t_1 \ll t_2$ и $G_{кр.1} \ll G_{кр.2}$ и поэтому из выражений (11) и (15) получаем следующие формулы:

$$t_2 = \frac{G_{кр.2} \cdot \delta \cdot n}{\sigma_w'' \cdot C_0 \cdot V}, \quad (36)$$

$$T_2 = \frac{G'_{кр.2} \cdot n}{\sigma_w''}, \quad (37)$$

которые практически точно отражают результаты экспериментов и являются основными расчетными формулами.

На рис. 5 приведена экспериментальная зависимость $\sigma_w''-T^*$ для "автомоделного режима", где

Табл 1. Результати опитов

N опитов	Характеристика фільтра	δ , см	V, м/час	C_o , мг/л	t_1 , час	t_2 , час	T_1 ,	T_2 ,	$G_{кр.1}$, мг/см ³	$G_{кр.2}$, мг/см ³	σ_w''
1	ВПП, $d_{\text{э.в.}} = 100$ мкм, $n = 0.77 \downarrow$	30	0.75	97	~ 10	250	~ 25	625	3	80	0.96
1a	Песок, $d_{\text{э.кв.}} = 0.45$ мм, $n = 0.36 \downarrow$	30	0.75	97	~ 2	75		187	~ 1	55	0.97
2	ВПП, $d_{\text{э.в.}} = 100$ мкм, $n = 0.77 \downarrow$	30	0.75	470	~ 8	50	20	125	~ 10	65	0.86
2a	Песок, $d_{\text{э.кв.}} = 0.45$ мм, $n = 0.36 \downarrow$	30	0.75	500	1	5	2.5	12.5	~ 4	15	0.78
3	ВПП, $d_{\text{э.в.}} = 50$ мкм, $n = 0.82 \downarrow$	30	0.75	460	16	70	40	175	21	90	0.92
3a	Песок, $d_{\text{э.кв.}} = 0.45$ мм, $n = 0.36 \downarrow$	30	0.75	490	9	25	20	62	20	65	0.78
4	ВПП, $d_{\text{э.в.}} = 100$ мкм, $n = 0.77 \downarrow$	30	1.5	104	3	80	15	400	2	50	0.92
4a	Песок, $d_{\text{э.кв.}} = 0.45$ мм, $n = 0.36 \downarrow$	30	1.5	92	3	25	15	125	7	32	0.90
5	ВПП, $d_{\text{э.в.}} = 100$ мкм, $n = 0.77 \downarrow$	30	1.5	480	2	12.5	10	62	5	39	0.83
6	ВПП, $d_{\text{э.в.}} = 125$ мкм, $n = 0.76 \uparrow$	30	1.5	96	4	135	20	675	2	55	0.65
6a	ППС, $d = 0.4 \div 2$ мм, $n = 0.36 \uparrow$	30	1.5	102	4	50	20	250	3	32	0.45
7	ВПП, $d_{\text{э.в.}} = 125$ мкм, $n = 0.75 \downarrow$	30	1.5	106	3	145	15	725	2	67	0.65
7a	ППС, $d = 0.4 \div 2$ мм, $n = 0.42 \downarrow$	30	1.5	103	5	75		560	3	40	0.43
8	ВПП, $d_{\text{э.в.}} = 100$ мкм, $n = 0.79 \downarrow$	30	3.0	103	1	18	10	180	2	20	0.80
8a	Песок, $d_{\text{э.кв.}} = 0.45$ мм, $n = 0.36 \downarrow$	30	3.0	103	1	18			2	20	0.80
9	ВПП, $d_{\text{э.в.}} = 125$ мкм, $n = 0.79 \uparrow$	30	3.0	102	3	165	30	1650	3	75	0.35
9a	ППС, $d = 0.4 \div 2$ мм, $n = 0.36 \uparrow$	30	3.0	101	3	165	30	1650	4	70	0.15
10	ВПП, $d_{\text{э.в.}} = 120$ мкм, $n = 0.79 \uparrow$	30	1.5	110	5	210	25	1050	2	66	0.45
10a	ППС, $d = 0.4 \div 2$ мм, $n = 0.36 \uparrow$	30	1.5	117	5	84	25	420	3	41	0.30
11	ВПП, $d_{\text{э.в.}} = 125$ мкм, $n = 0.79 \uparrow$	30	2.9	390	1	20	10	200	2	44	0.44
12	ВПП, $d_{\text{э.в.}} = 125$ мкм, $n = 0.79 \uparrow$	30	1.5	350	3	35	15	175	4	52	0.62
12a	ППС, $d = 0.4 \div 2$ мм, $n = 0.36 \uparrow$	30	1.5	350	1	17	5	85	2	32	0.38
13	ВПП, $d_{\text{э.в.}} = 125$ мкм, $n = 0.79 \uparrow$	30	1.5	227	1	45	5	225	1	39	0.60
14	ВПП, $d_{\text{э.в.}} = 125$ мкм, $n = 0.79 \uparrow$	30	3.0	55	10	108	100	1080	4	41	0.47
15	ВПП, $d_{\text{э.в.}} = 125$ мкм, $n = 0.79 \uparrow$	30	3.0	195	1	32	10	320	1	48	0.51

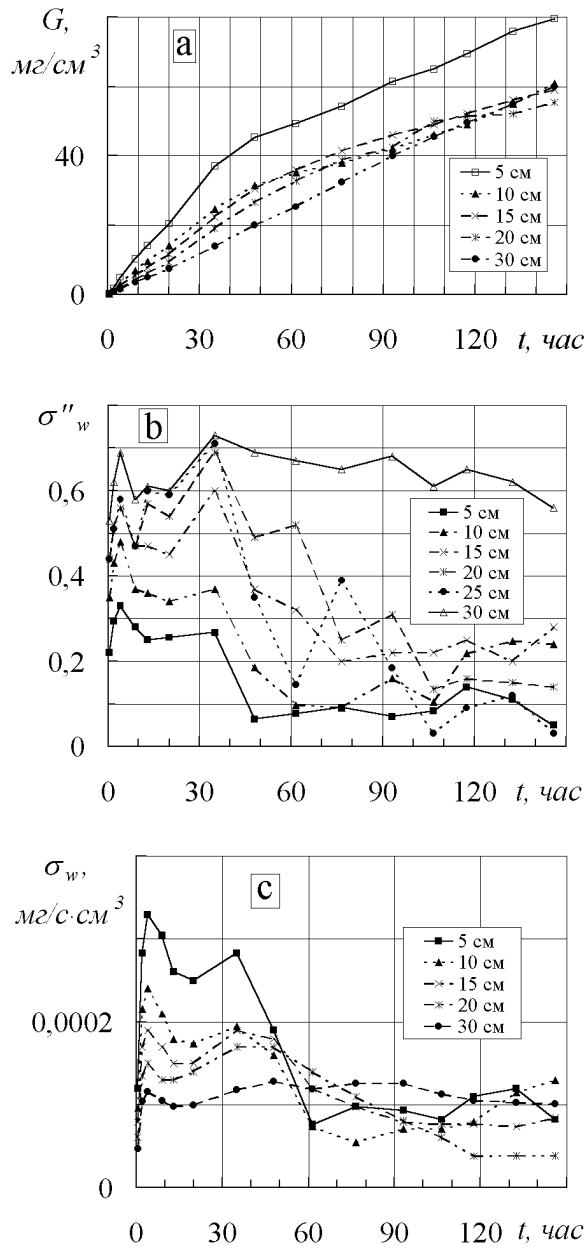


Рис. 3. Экспериментальные зависимости $G = f(t)$ (a), $\sigma_w'' = f(t)$ (b) и $\sigma_w = f(t)$ (c) для опыта 6

$T^* = \frac{t^* \cdot V}{\delta}$ – параметр, представляющий собой безразмерное время при $t^* = 1$.

Видно, что независимо от C_0 , δ и V для исследованных фильтров, существует явно выраженная зависимость $\sigma_w'' = f(T^*)$. Кроме того, следует отметить, что при всех прочих равных условиях степень очистки фильтром ППС несколько меньше, а фильтром из песка – несколько больше, чем фильтром ВПП.

Для фильтров ВПП ($d_{э.в.} = 100 \div 125$ мкм, $C_0 =$

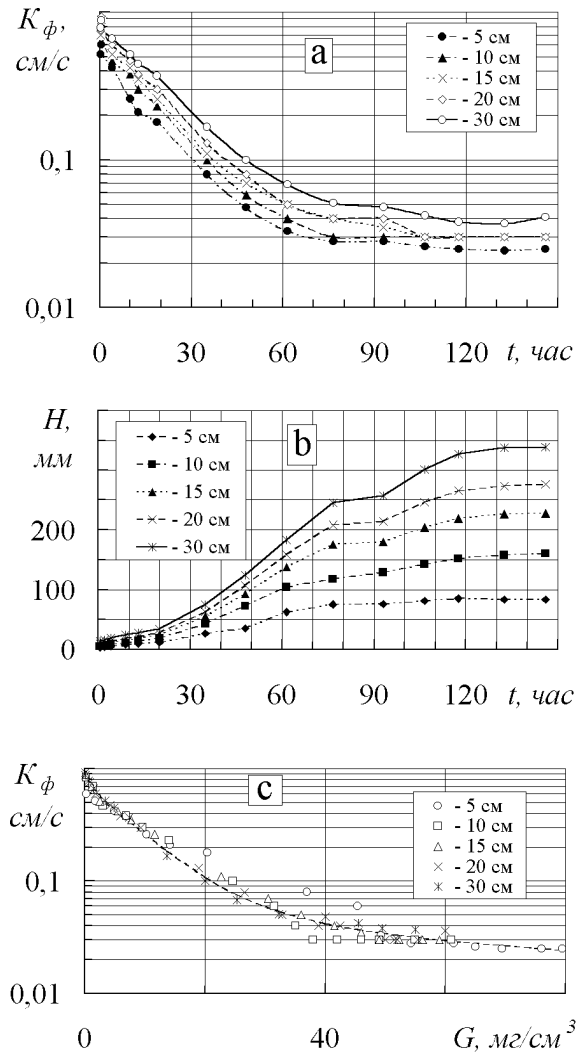


Рис. 4. Экспериментальные зависимости $K_\phi = f(t)$ (a), $H = f(t)$ (b) и $K_\phi = f(G)$ (c) для опыта 6

$50 \div 600$ мг/л и $V = 0.75 \div 3$ м/час) получена эмпирическая зависимость для определения σ_w'' :

$$\sigma_w'' = 1.9(T^*)^{-0.66}, \quad (38)$$

которая позволяет получить зависимости $\sigma_w'' - \delta$ при различных V или $\sigma_w'' - V$ при различных δ .

Зависимости $K_\phi - t$ и $K_\phi - G$ показанные на рис. 4, являются типичными для всех опытов. В каждом опыте можно выделить кривую $K_\phi - t$, соответствующую определенному значению δ . Но на графике $K_\phi - G$ в каждом опыте, независимо от δ , можно провести одну кривую.

Распределение $G \cdot n$ по глубине фильтра. Результаты опытов позволяют построить эпюры распределения удельного заиления фильтра $G \cdot n$

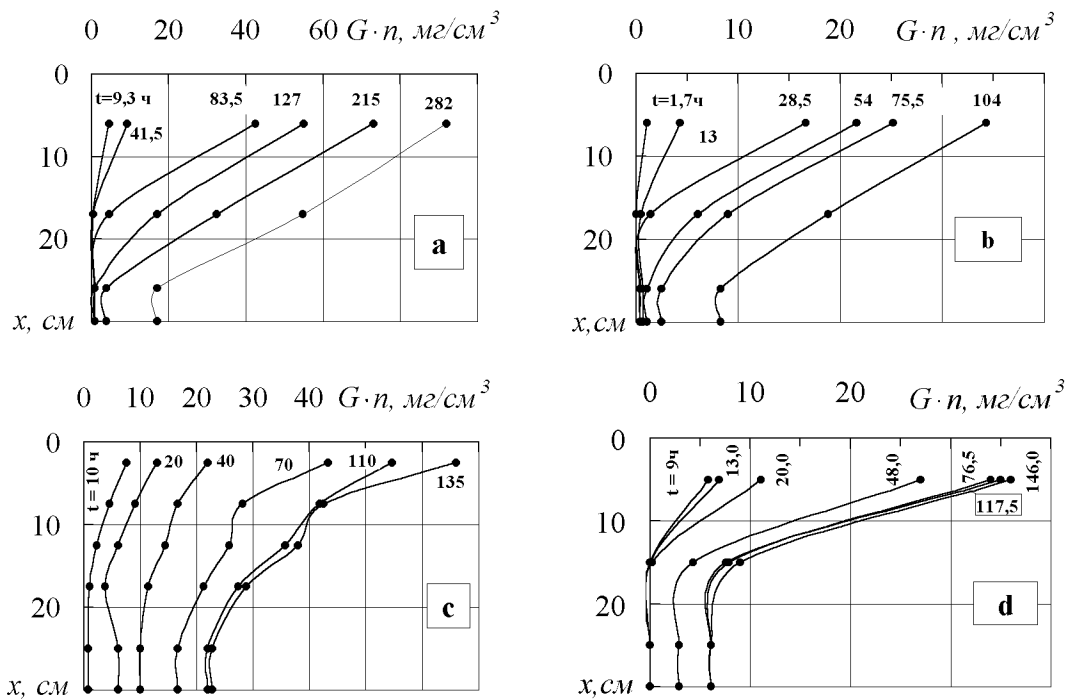


Рис. 6. Экспериментальные зависимости $G \cdot n = f(x)$:
 a – Опыт 1, ВПП; b – Опыт 1а, песок; c – Опыт 6, ВПП; d – Опыт 6а, ППС

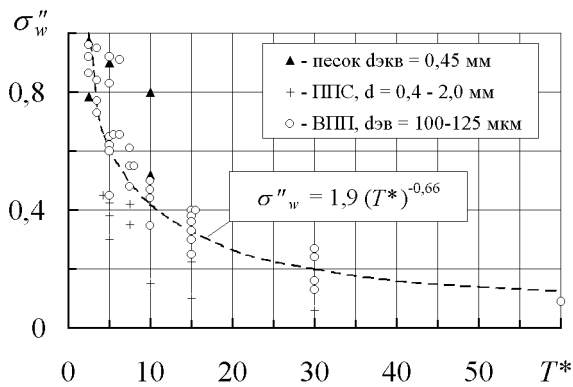


Рис. 5. Экспериментальные зависимости $\sigma_w'' = f(T^*)$ для фильтров из ВПП, ППС и песка

по глубине фильтра. На рис. 6 приведены такие эпюры для опытов 1 и 1а (песок) и опытов 6 и 6а (ППС).

Видно, что при $t = t_1 \div t_2$ ("автомодельный режим") удельное заиливание в верхней трети фильтра по ходу движения суспензии значительно больше, чем в нижней трети. При $t > t_2$ накопление осадка в верхней трети фильтра замедляется и стремится к постоянному значению, но в остальной

части фильтра накопление осадка продолжается. При этом в фильтрах ВПП накопление осадка $G \cdot n$ значительно больше, чем в фильтрах из песка и ППС. Это связано, в первую очередь, с большей пористостью фильтров ВПП.

Изменение σ_w'' по глубине фильтра. Зависимость (38) получена при $\delta = 5 \div 30$ см. При $\delta = \text{const}$ и $V = \text{const}$ степень очистки σ_w'' должна быть одинаковой. Это означает, что если разделить фильтр на элементарные слои одинаковой толщины, то для каждого слоя $\sigma_w'' = \Delta C / C$ должна быть одинаковой (здесь C – концентрация перед слоем, ΔC – снижение концентрации в слое). На рис. 7 приведены результаты такого анализа для опытов 6 и 10. Действительно, в "автомодельном режиме" степень очистки каждого слоя одинакова, однако во времени слои работают не одинаково. Зарядка элементарных слоев происходит последовательно. Степень очистки в верхнем слое в начале процесса больше, а в конце – меньше, чем в нижележащих слоях. При выходе на "автомодельный режим" всего фильтра основную нагрузку по снижению концентрации суспензии принимает на себя верхний слой, нижележащие слои работают мало или не работают вовсе. Такой механизм работы фильтра позволяет получить формулы для

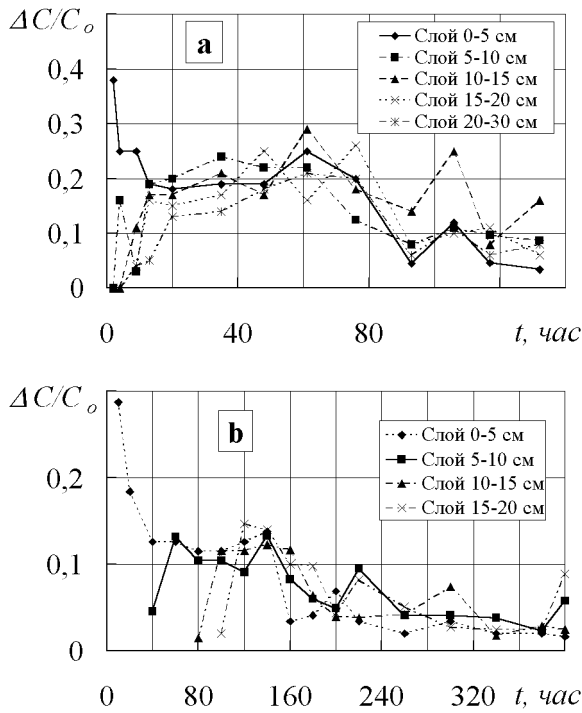


Рис. 7. Экспериментальные зависимости $\Delta C/C_0 = f(t)$:
 а - Опыт 6; б - Опыт 10

определения степени очистки фильтра толщиной 2δ , 3δ и т. д., если известна σ''_w для фильтра толщиной δ :

$$\sigma''_{w,2} = 2\sigma''_w - (\sigma''_w)^2,$$

$$\sigma''_{w,3} = 3\sigma''_w - 3(\sigma''_w)^2 + (\sigma''_w)^3, \quad (39)$$

где $\sigma''_{w,2}$, $\sigma''_{w,3}$ и $\sigma''_{w,4}$ - при толщине фильтра 2δ , 3δ и 4δ соответственно.

Зависимость $G' \cdot n - T$, как отмечалось выше, представляет собой пучок прямых линий-лучей с угловым коэффициентом σ''_w . Действительно, опытные точки при $\sigma''_w = \text{const}$ для различных фильтров лежат на одной прямой, но критические значения $(G' \cdot n)_{кр.2}$ при $T = T_2$ для фильтра ВПП больше, чем для ППС и песка примерно в $n_b/n_3 = 2.5$, где n_b - пористость фильтра ВПП, n_3 - пористость зернистого фильтра.

Для расчета фильтра необходимо знать $(G \times n)_{кр.2}$, которое зависит от типа фильтра, степени очистки σ''_w и C_0 . На рис. 8 для фильтра ВПП

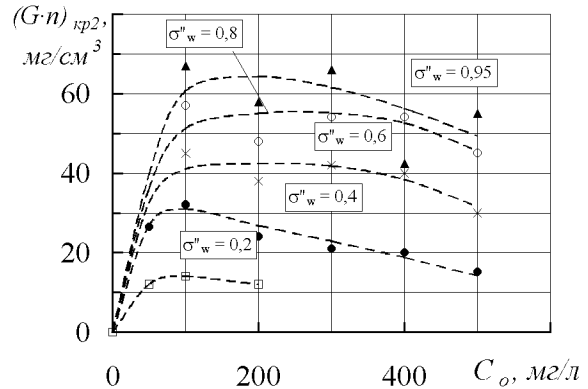


Рис. 8. Экспериментальные зависимости для фильтра ВПП при $d_{э.в.} = 100 \div 125$ мкм

при $d_{э.в.} = 100 \div 125$ мкм приведены экспериментальные зависимости для определения $(G \cdot n)_{кр.2}$.

Зависимость $H - t$. При заилинии фильтра пористость n_3 уменьшается, что приводит к уменьшению $K_{ф.з.}$ и возрастанию H . При нарушении автомодельности σ''_w уменьшается, $K_{ф.з.} \rightarrow \text{const}$, $H \rightarrow \text{const}$ и даже может уменьшиться. Физически это означает, что в пределе суспензия проходит через фильтр транзитом, не осветляясь. При этом фильтр не заиливается полностью.

Для расчета фильтра необходимо знать потери напора H , которые определяются $K_{ф.з.}$. Получить обобщающую зависимость для определения $K_{ф.з.}$ не удалось. Однако, проведя тестовые испытания фильтра при известных δ , V и C_0 и обработав опыты, можно построить зависимость $K_{ф.з.} - G$. Эту зависимость при других значениях δ можно использовать в прогнозных расчетах фильтра.

3.4. Тестовые испытания и прогнозный расчет фильтров ВПП

Как известно [1-7, 22-24], степень очистки во многом зависит от физико-химических свойств воды. Поэтому при проектировании фильтров необходимо провести тестовые испытания фильтра на воде из того источника, который предполагается использовать для водоснабжения. Учитывая, что для питьевого водоснабжения ПДК = 3.0 мг/л, определяем необходимую степень очистки воды $[\sigma''_w] = (C_0 - 3)/C_0$. Если σ''_w при тестовых испытаниях окажется меньше $[\sigma''_w]$, то необходимо провести прогнозный расчет фильтра, используя закономерности кинетики фильтрования, получен-

ные выше.

Пример расчета. При тестовых испытаниях фильтра ВПП ($d_{э.в.} = 125$ мкм, $n = 0.76$, $\delta = 20$ см, $V = 1.5$ м/час) получены следующие результаты: $C_0 = 100$ мг/л, $t_1 = 3$ час, $t_2 = 80$ час, $\sigma_w'' = 0.5$, $G_{кр.2} = 31.6$ мг/см³, $[\sigma_w''] = 0.97$. Так как $\sigma_w'' < [\sigma_w'']$, необходимо увеличить толщину фильтра или уменьшить V .

По формулам (39) определяем степень очистки при увеличении толщины фильтра: при $\delta = 40$ см $\sigma_w'' = 0.75$, при $\delta = 60$ см $\sigma_w'' = 0.87$, при $\delta = 80$ см $\sigma_w'' = 0.96$. При $\delta = 80$ см $T^* = \frac{1 \cdot 1.5}{0.8} = 1.88$. Такое же значение T^* будет иметь фильтр $\delta = 40$ см при $V = 0.75$ м/час.

Таким образом, для получения воды необходимого качества можно установить один фильтр толщиной 80 см при $V = 1.5$ м/час или два фильтра $\delta = 40$ см, соединенных параллельно, при $V = 0.75$ м/час. Производительность такой установки будет 1.5 м³/час на 1 м² фильтра.

Продолжительность фильтроцикла определяем по формуле (36), в которой $G_{кр.2} \cdot n$ находим, используя экспериментальные зависимости, представленные на рис. 8. Для фильтра при $\delta = 80$ см и $V = 1.5$ м/час, $t_2 = 340$ час, а для фильтра при $\delta = 40$ см и $V = 0.75$ м/час, $t_2 = 360$ час.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕЙСТВИТЕЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПОРИСТОСТИ И ПЛОТНОСТИ ОСАДКА В ПОРАХ ЗАИЛЕННОГО ФИЛЬТРА

Действительная пористость $n_э$ и плотность осадка в порах в зернистых фильтрах изучены мало [18–20], а в объемных фильтрах из волокнистых материалов, подобных ВПП, такие исследования не проводились вовсе.

4.1. Экспериментальная установка и методика исследований

Для определения действительной пористости заиленного фильтра $n_э$ использовали индикаторный метод. При движении потока жидкости через фильтр со скоростью фильтрации V средняя скорость в порах будет $V/n_э$. Тогда расчетное время прохождения условного фронта суспензии через фильтр толщиной δ будет $t_{расч} = \frac{\delta \cdot n_э}{V}$, которое может не совпадать с фактическим временем $t_{факт}$ из-за образования застойных зон за волокнами и в местах дискретного скопления волокон.

В этом случае $t_{факт}/t_{расч} = \beta$. Тогда получим

$$n_э = \frac{t_{факт} \cdot V}{\delta \cdot \beta}, \quad (40)$$

где $t_{факт}$ и β определены экспериментально.

Исследования проводились на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 9.

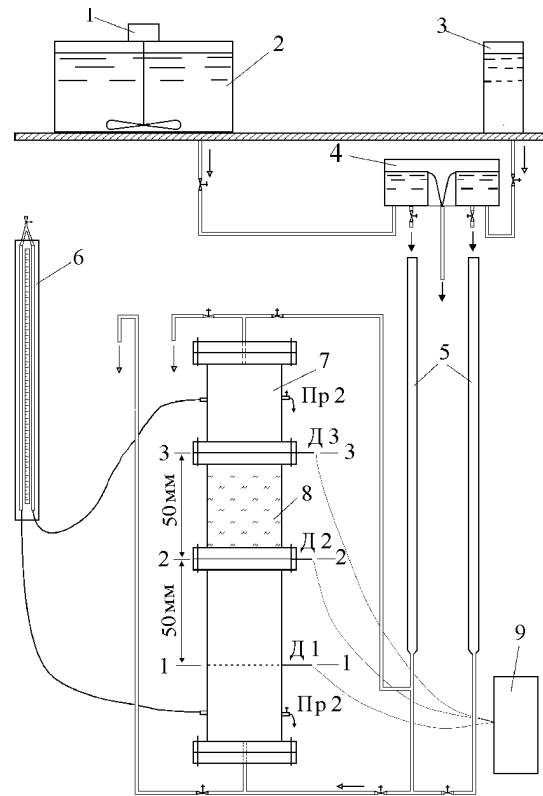


Рис. 9. Схема установки для исследования кинетики и пористости индикаторным методом:

- 1 – мешалка; 2 – емкость для суспензии; 3 – емкость для солевого раствора; 4 – напорный бачок постоянного уровня; 5 – регуляторы скорости; 6 – наклонный дифференциальный микроманометр; 7 – фильтрационный прибор; 8 – фильтрующая загрузка; 9 – быстродействующий самописец Н3031; Д1...Д3 – датчики; П1, П2 – пьезометры; Пр1, Пр2 – пробоотборники

Фильтрационный прибор 7 представлял собой цилиндр из ПВХ трубы с внутренним диаметром 40 мм, состоящий из трех частей. Внутренняя поверхность средней части, в которую помещался фильтр, имела повышенную шероховатость для предотвращения контактной фильтрации. Прибор был оборудован датчиками Д1, Д2, Д3, которые представляли собой две параллельные струны-электрода из нержавеющей стали, пересекающие трубу по диаметру. Расстояние между электрода-

ми было 3.0 мм. Датчики использовали для фиксации концентрации солевого раствора, который применялся в качестве индикатора движения потока жидкости через фильтр. Концентрация солевого раствора (NaCl) составляла 1300 мг/л. Изменение электропроводности суспензии с помощью датчиков фиксировалось быстродействующим самописцем Н3031.

На рис. 10 показана типичная осциллограмма для опыта 1с. Определение $n_{э}$ проводилось в процессе опыта по исследованию кинетики фильтрования при постоянной скорости V в следующей последовательности. В начале опыта пропускали через фильтр чистую воду и определяли начальные значения $K_{ф}$ и H . Затем воду замещали солевым раствором. Фильтрация, как при очистке, так и при движении солевого раствора была снизу вверх. Скорость солевого раствора $V_c < V$. После прохождения солевого раствора через фильтр, что было видно по реакции датчиков на осциллограмме, солевой раствор вытеснялся из фильтра и всего прибора при движении суспензии сверху вниз, а затем продолжалось фильтрование суспензии в режиме очистки. Обработав осциллограмму для чистого фильтра, определяли β . Действительно, $\beta < 1$. Это говорит о том, что следует выделить активную пористость $n_{а.э}$:

$$n_{а.э} = n_{э} \cdot \beta, \quad (41)$$

которую будем использовать при определении u -

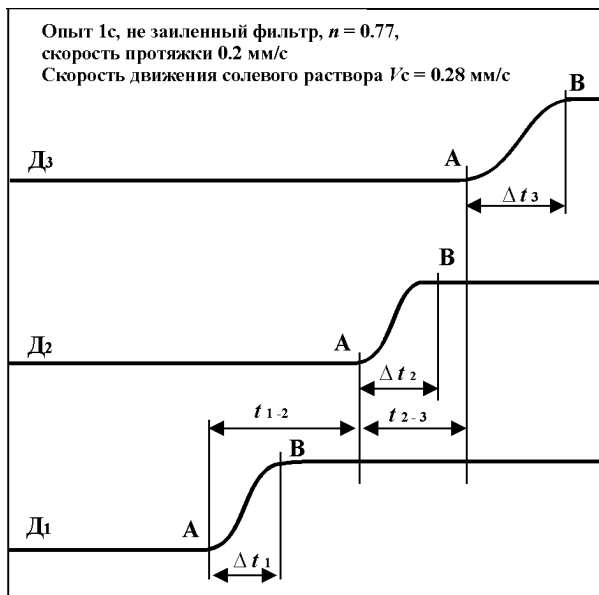


Рис. 10. Образец осциллограммы для опыта 1с

средней скорости движения суспензии в порах:

$$u = \frac{V}{n_{а.э}}. \quad (42)$$

Как видно из рис. 10, на осциллограмме для каждого датчика существуют две характерные точки A и B . В точке A фронт солевого потока, а в точке B ядро солевого потока пересекают датчики. Между фронтом и ядром солевого потока существует переходной слой, в котором концентрация соли изменяется от 0 до 1300 мг/л. Анализ осциллограмм показал, что толщина переходного слоя по мере заилиения фильтра возрастает, в то же время концентрация соли на границе солевого фронта и солевого ядра практически не изменяется. Это означает, что при прохождении солевого раствора через фильтр происходит разрушение ядра, переформирование и расширение переходного слоя. Поэтому значение $n_{э}$ определяем по характерной точке A .

4.2. Результаты экспериментов

Всего проведено пять опытов с фильтром ВПП ($d_{э.в} = 125$ мкм, $n = 0.77$, $\delta = 20$ мм) при $V = 1.5 \div 3.2$ м/час, $C_0 = 64 \div 210$ мг/л и выполнено 50 определений $n_{э}$. В результате обработки опытов построены зависимости $n_{э}-t$, $G-n_{э}$, $\rho-T$, $C_{oc}-T$, $K_{ф}-G$, $K_{ф}-\rho$ и $H-\rho$, рис. 11 - 13.

Видно, что при заилинии фильтра пористость быстро уменьшается и после нарушения "автомоделности" плавно стремится к постоянному значению. Предельное значение $n_{э,пр} \approx 0.2 \div 0.25$.

Косвенно эти результаты согласуются с результатами подобных исследований для зернистых фильтров [18-20]. Зависимость $G-n_{э}$ независимо от V и C_0 можно представить одной кривой.

Зависимость $\rho-T$ в "автомоделной области" может быть описана линейной зависимостью. При нарушении "автомоделности" линейность нарушается и ρ стремится к предельному значению, которое достигает $\rho_{пр} = 0.7 \div 0.75$.

Так как $G = \rho \cdot C_{oc}$, в "автомоделной области" $C_{oc} \approx \text{const}$. Действительно, на рис. 13 при $T = T_2$ значение $C_{oc} = 0.05 \div 0.06$ г/см³. При нарушении "автомоделности" C_{oc} возрастает до $0.08 \div 0.1$ г/см³. Интересно, что $C'_{oc} = C_{oc}/C_0 = 500 \div 1000$, но при этом $\gamma_{oc} = 1.03 \div 1.06$ г/см³.

Зависимости $K_{ф}-G$ и $K_{ф}-\rho$ могут быть описаны одной кривой независимо от V и C_0 . В "автомоделной области" при $\rho < 0.6$ и $n_{э} > 0.25$ эти зависимости линейные.

Зависимость $H-\rho$. На рис. 14 приведены ре-

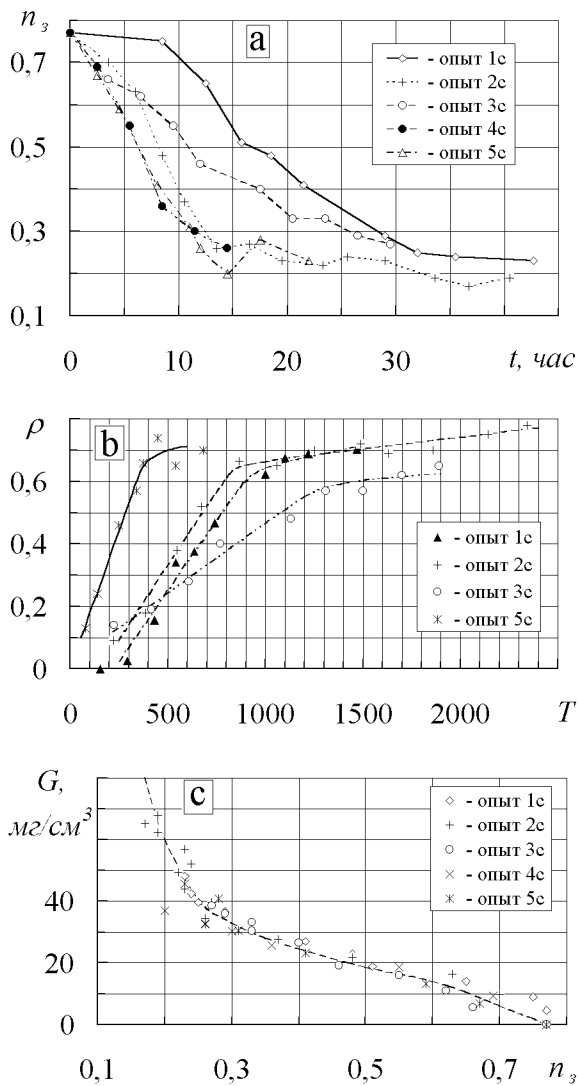


Рис. 11. Экспериментальные зависимости $n_3 = f(t)$ (a), $\rho = f(T)$ (b), $G = f(n_3)$ (c)

зультаты опытов, которые, несмотря на большой разброс, отражают определенную тенденцию возрастания H при увеличении ρ . Используя зависимость $K_\phi - \rho$, были вычислены значения H при $V = 1.5$ м/час и $V = 3.2$ м/час, а также построены расчетные кривые $H - \rho$. Видно, что все опытные точки лежат внутри области, ограниченной кривыми при минимальном и максимальном значении V , при которых проведены опыты. Таким образом, для определения H достаточно использовать зависимость для K_ϕ .

4.3. Зависимость $K_\phi - n_3$

На рис. 15 в системе координат $K_\phi - n_3$ приведены результаты опытов. Видно, что независимо

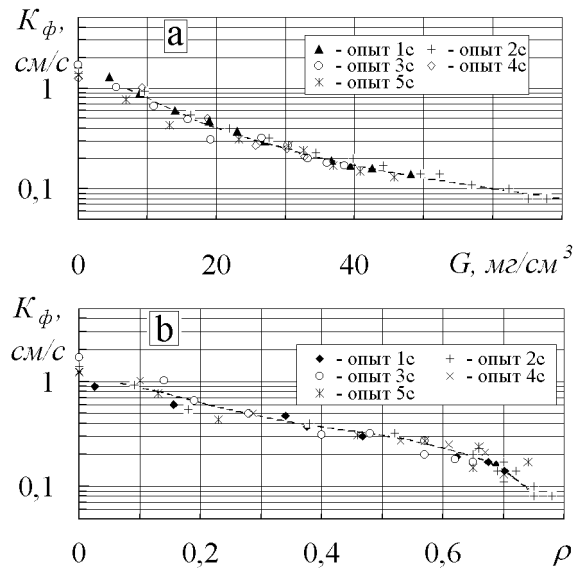


Рис. 12. Экспериментальные зависимости $K_\phi = f(G)$ (a) и $K_\phi = f(\rho)$ (b) для фильтра ВПП ($d_{\text{э.в.}} = 100 \div 125$ мкм, $n = 0.77$, $\delta = 5$ см)

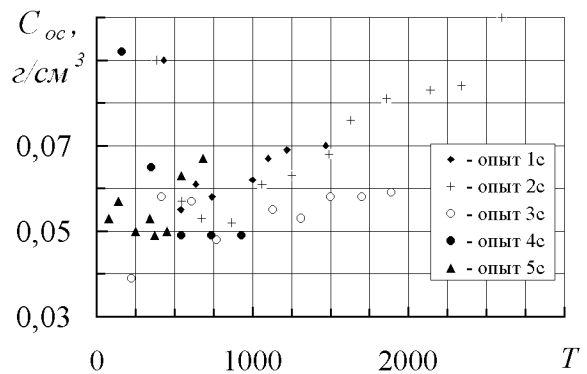


Рис. 13. Экспериментальные зависимости $C_{0c} = (T)$

от V и C_0 все опыты могут быть описаны одной кривой.

Выше была рассмотрена модель фильтрации, когда фильтр ВПП рассматривался как капиллярно-пористое тело, и получена расчетная формула (35). Теперь представляется возможность оценить, насколько такая модель соответствует результатам экспериментов.

В формулу (35) входит функция $f(n)$, которая определяется по рис. 1. Для исследованного фильтра ВПП (при $d_{\text{э.в.}} = 125$ мкм) при "автомодельном режиме" ($0.25 < n < 0.82$) функция $f(n)$ мо-

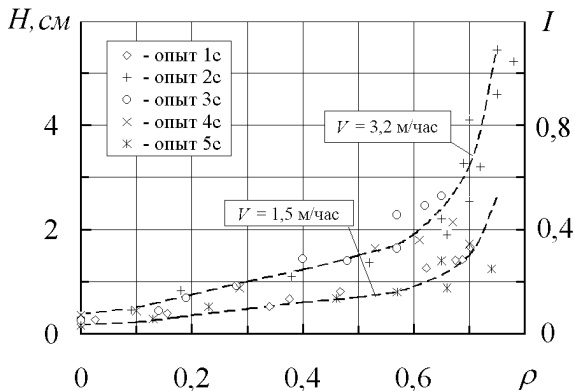


Рис. 14. Экспериментальные зависимости $H = f(\rho)$

K_{Φ} , см/с	$n_{з.оп}$	$n_{з.расч}$
1.20	0.750	0.720
0.80	0.670	0.650
0.60	0.615	0.610
0.50	0.550	0.575
0.40	0.480	0.545
0.30	0.390	0.510
0.25	0.330	0.485
0.20	0.275	0.460
0.15	0.230	0.420
0.10	0.200	0.380
0.08	0.180	0.360

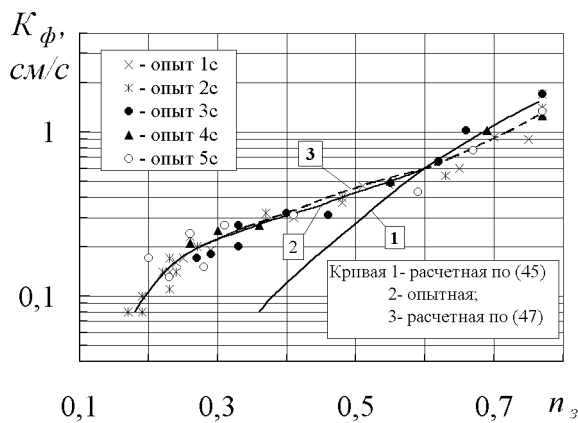


Рис. 15. Опытные и расчетные зависимости $K_{\Phi} = f(n_z)$ для фильтра ВПП ($d_{э.в.} = 125$ мкм, $n = 0.77$, $\delta = 5$ см) при безреагентной очистке

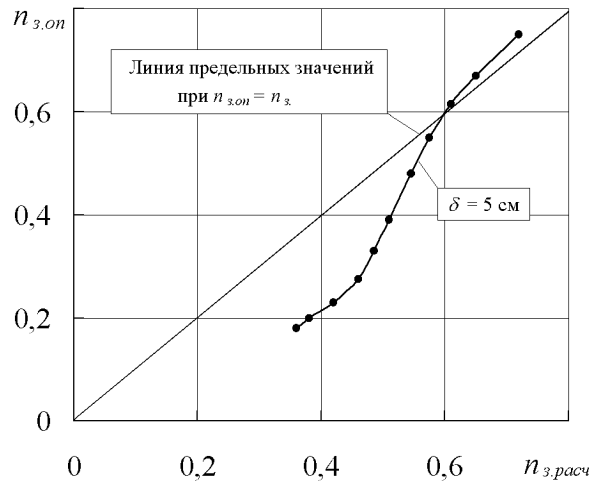


Рис. 16. Опытная и расчетная зависимость $n_{з.оп} = f(n_{з.расч})$ для фильтра ВПП ($d_{э.в.} = 125$ мкм, $n = 0.77$, $\delta = 5$ см) при безреагентной очистке

жет быть аппроксимирована зависимостью

$$f(n) = 1.5 \cdot n^{-1.9}. \quad (43)$$

При $n = n_z$ из формулы (35) получим

$$n_z = \sqrt[3.9]{\frac{192(1-n)^2 \cdot \nu \cdot K_{\Phi.з.}}{\pi \cdot g \cdot d_{э.в.}^2}}. \quad (44)$$

Для наших опытов при $d_{э.в.} = 125$ мкм, $n = 0.77$, $\nu = 0.011$ см²/с, $g = 980$ см/с² зависимость (44) будет иметь вид

$$n_z = \sqrt[3.9]{0.234 \cdot K_{\Phi.з.}}, \quad (45)$$

где $K_{\Phi.з.}$ в см/с.

На рис. 15 построена расчетная зависимость по (45). Видно, что модель близка к опытным значе-

ниям только в начале процесса при $G < 10$ мг/см³. При возрастании G расхождение между опытными и расчетными значениями возрастает, но в "автомодельной области" между расчетными $n_{з.расч}$ и опытными $n_{з.оп}$ существует линейная зависимость (рис. 16):

$$n_{з.оп} = 2.22(n_{з.расч} - 0.34). \quad (46)$$

Тогда формула (44) получит следующий вид:

$$n_z = 2.22 \left(\sqrt[3.9]{\frac{192(1-n)^2 \cdot \nu \cdot K_{\Phi.з.}}{\pi \cdot g \cdot d_{э.в.}^2}} - 0.34 \right). \quad (47)$$

Таким образом, хотя модель не соответствует эксперименту, но с учетом поправки позволяет по-

лучить в аналитическом виде формулу для определения $n_{\text{э}}$ в зависимости от опытного значения $K_{\text{ф.э.}}$.

5. РЕГЕНЕРАЦИЯ ФИЛЬТРА ВПП

Регенерация зернистых фильтров производится посредством обратной промывки фильтра при одновременном взвешивании или расширении слоя фильтра. Фильтр ВПП по своей структуре не позволяет использовать такой метод. Поэтому нами разработан способ регенерации фильтра с использованием пульсирующей фильтрации. Пульсирующую фильтрацию в фильтре можно получить с помощью пульсатора давления или пульсатора скорости фильтрации, установленных на крышке очистного аппарата.

5.1. Аналитические исследования

5.1.1. Пульсатор давления

На крышке аппарата установлен генератор импульсов давления, которое изменяется по синусоидальному закону:

$$P = \frac{A_o}{2} \cdot \sin \omega t, \quad (48)$$

где P – давление; A_o – амплитуда пульсации давления; $\omega = 2\pi \cdot n_o$; n_o – частота пульсации; t – время.

Силе пульсационного давления $F_{\text{п}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \times \frac{A_o}{2} \sin \omega t$ противодействует сила инерционного сопротивления воды в порах фильтра $F_{\text{и.ф}} = m_{\text{в}} \cdot u'$ и сила фильтрационного сопротивления фильтра $F_{\text{ф}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \Delta P$. Силой упругого сопротивления фильтра пренебрегаем. Тогда, учитывая, что при ламинарной фильтрации в заиленном фильтре $V_{\text{ф}} = K_{\text{ф}} \frac{\Delta P}{\gamma_{\text{в}} \cdot g \cdot \delta}$ и средняя скорость в порах $u = V_{\text{ф}}/n_{\text{а.э.}}$, получаем

$$F_{\text{п}} = F_{\text{и.ф}} + F_{\text{ф}}, \quad (49)$$

$$au' + bu = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \frac{A_o}{2} \sin \omega t, \quad (50)$$

где

$$a = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \delta \cdot n_{\text{а.э.}} \cdot \gamma_{\text{в}}, \quad (51)$$

$$b = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \frac{\gamma_{\text{в}} \cdot g \cdot \delta \cdot n_{\text{а.э.}}}{K_{\text{ф}}}. \quad (52)$$

В этих формулах: D – внутренний диаметр прибора; $n_{\text{а.э.}}$ – активная пористость заиленного фильтра; $\gamma_{\text{в}}$ – массовая плотность воды; δ – толщина фильтра; g – ускорение силы тяжести; u' – ускорение средней скорости в порах фильтра.

Решением уравнения (50) будет

$$u = \frac{\pi \cdot D^2}{4a} \cdot \frac{A_o}{2} \cdot e^{-\frac{b}{a}t} \times \left(\frac{\frac{b}{a} \sin \omega t - \omega \cos \omega t}{\left(\frac{b}{a}\right)^2 + \omega^2} e^{\frac{b}{a}t} + C_1 \right). \quad (53)$$

Постоянную интегрирования C_1 находим из начального условия: $t = 0, u = 0$

$$C_1 = \frac{\omega}{\left(\frac{b}{a}\right)^2 + \omega^2}. \quad (54)$$

Тогда из выражения (53) получаем

$$u = \frac{\pi \cdot D^2}{4a} \cdot \frac{A_o}{2} \cdot \frac{\frac{b}{a} \sin \omega t - \omega \cos \omega t}{\left(\frac{b}{a}\right)^2 + \omega^2} + \frac{\pi \cdot D^2}{4a} \cdot \frac{A_o}{2} \cdot \frac{\omega}{\left(\frac{b}{a}\right)^2 + \omega^2} \cdot e^{-\frac{b}{a}t}. \quad (55)$$

При $K_{\text{ф}} = (0.0003 \div 0.01)$ м/с предельные значения b/a для нашего фильтра будут лежать в пределах $(33000 \div 980)$ 1/с, а ω^2 при $n_o = 1 \div 10$ Гц будет равняться $37 \div 3700$. Видно, что при этих значениях b/a величина $e^{-\frac{b}{a}t}$ быстро стремится к 0. Поэтому для нашего случая можно записать выражение

$$u = \frac{\pi \cdot D^2}{4a} \cdot \frac{A_o}{2} \cdot \frac{\frac{b}{a} \sin \omega t - \omega \cos \omega t}{\left(\frac{b}{a}\right)^2 + \omega^2}, \quad (56)$$

которое преобразовывается к виду

$$u = \frac{\pi \cdot D^2}{4a} \cdot \frac{A_o}{2} \cdot \frac{\sin(\omega t - \varphi)}{\sqrt{\left(\frac{b}{a}\right)^2 + \omega^2}}, \quad (57)$$

где $\varphi = \arctg \frac{\omega \cdot a}{b}$ – угол сдвига фаз между силой $F_{\text{и}}$ и скоростью u .

Максимальное и минимальное значения u будут при $\sin(\omega \cdot t - \varphi) = \pm 1$. Тогда для нашего случая, когда $\left(\frac{b}{a}\right)^2 \gg \omega^2$, получим

$$u_{max/min} = \pm \frac{A_o \cdot K_\Phi}{2\gamma_B \cdot g \cdot \delta \cdot n_{a.з.}} \quad (58)$$

Расчеты показывают, что даже при незначительной пульсации давления, u_{max} может составлять значительную величину. Например, при $\delta = 30$ см, $K_\Phi = (0.0005 \div 0.0035)$ м/с и $A_o/2 = 1$ м в.ст., максимальное значение пульсации скорости фильтрации $u_{max} \cdot n_{a.з.} = (6 \div 42)$ м/час.

5.1.2. Пульсатор скорости фильтрации

Пульсатор скорости фильтрации может представлять собой обычный поршневой насос, установленный на крышке прибора.

Изменение пульсации скорости фильтрации в приборе диаметром D происходит по синусоидальному закону $V = (V_o/2) \sin \omega t$. Тогда можно записать

$$dW = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \frac{V_o}{2} \sin \omega t \cdot dt, \quad (59)$$

где dW – объем вытесняемой жидкости за время dt ; V_o – амплитуда колебания пульсирующей скорости фильтрации.

Полный объем W за время $t = 1/(2n_o)$ будет

$$W = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \frac{V_o}{2} \cdot 2 \int_0^{\frac{1}{4n_o}} \sin \omega t \cdot dt = \frac{D^2 \cdot V_o}{4n_o \cdot 2} \quad (60)$$

и

$$\frac{V_o}{2} = \frac{W \cdot 4 \cdot n_o}{D^2}. \quad (61)$$

Для поршневого пульсатора диаметром d

$$W = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot f_o, \quad (62)$$

где f_o – амплитуда перемещения поршня. Приравняв W в выражениях (61) и (62), получаем максимальное значение пульсирующей скорости фильтрации, создаваемое пульсатором скорости:

$$\frac{V_o}{2} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot f_o \cdot n_o}{D^2}. \quad (63)$$

Например, при $D = 14$ см, $d = 3$ см, $n_o = 0.52 \div 2$ Гц, $f_o = 5$ см $V_o/2 = (13 \div 52)$ м/час.

5.2. Экспериментальные исследования

Для проведения экспериментов по регенерации фильтра ВПП фильтрационный прибор, на котором проводились опыты по изучению кинетики фильтрования, дополнялся поршневым пульсатором скорости фильтрации. Регенерация проводилась в опытах 11 – 15 с одним и тем же фильтром без его перегрузки. После завершения фильтроцикла в опыте 11 фильтр подвергался регенерации, и проводился опыт 12 и так далее, но каждый раз заиливание фильтра происходило при других параметрах фильтрования (C_o и V).

Регенерация фильтра проводилась в два этапа. На первом этапе определялось влияние величины промывочной скорости $V_{пр}$ на степень регенерации фильтра при обратной промывке. Для этого $V_{пр}$ повышали ступенями, и на каждой ступени, после относительного осветления потока и стабилизации напора на фильтре, определяли коэффициент фильтрации фильтра. Таких ступеней было несколько, а $V_{пр}$ повышали до $(10 \div 30)V$.

На втором этапе на установившийся фильтрационный поток накладывали пульсацию скорости, повышая ступенями максимальное значение пульсирующей скорости фильтрации $V_o/2 = (1 \div 2)V_{пр}$. При этом изменяли f_o и n_o . На каждой ступени определяли коэффициент фильтрации фильтра.

Оценка степени регенерации фильтра основывалась на экспериментальной зависимости $K_\Phi - G$ для каждого опыта. Определив K_Φ на каждой ступени, находим остаточное заиливание $G_{ост}$. Зная заиливание в начале регенерации G_n , равное G в конце фильтроцикла, определяли степень регенерации фильтра $\sigma_{рег}$:

$$\sigma_{рег} = \frac{G_n - G_{ост}}{G_n} 100\%. \quad (64)$$

В результате анализа опытов получены следующие результаты.

При обратной промывке с постоянной скоростью $V_{пр} \geq 20$ м/час степень регенерации фильтра не превышает $\sigma_{рег} \approx 80\%$.

При наложении на постоянный поток пульсирующей фильтрации степень регенерации фильтра возрастает до $\sigma_{рег} = 90 \div 95\%$. Но при этом $V_o/2 = (1.5 \div 2)V_{пр}$, а $n_o = 1 \div 2$ Гц. В этом случае в фильтре образуется знакопеременный фильтрационный поток, который разрушает осадок в порах. Воздействие пульсации должно быть кратковременным (10 – 20 циклов), а весь период промывки составлять ≈ 5 минут.

При скорости промывки $V_{пр}$ и продолжитель-

ности промывки $t_{\text{пром}}$, учитывая продолжительность фильтроцикла ($t_2 - t_1$) и скорость фильтрования V , можно определить коэффициент полезного действия очистного устройства $K_{\text{п.д.}}$ по следующей формуле:

$$K_{\text{п.д.}} = \left(1 - \frac{V_{\text{пр}} \cdot t_{\text{пром}}}{V(t_2 - t_1)}\right) 100\%. \quad (65)$$

Для опытов 11 – 15 $K_{\text{п.д.}} = 97 \div 99\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных экспериментальных исследований безреагентной очистки малоцентрированной тонкодисперсной ($d \leq 10$ мкм) суспензии фильтрами из волокнисто-пористого полиэтилена (ВПП) ($d_{\text{э.в.}} = 50 \div 125$ мкм, $n = 0.75 \div 0.82$, $C_0 = 50 \div 500$ мг/л) получены следующие новые результаты.

1. Фильтры ВПП могут осветлять суспензию не хуже, чем используемые сейчас зернистые фильтры из песка и пенополистирола (ППС). Однако грязеемкость и продолжительность фильтроцикла фильтров из ВПП значительно больше, что определяется, в основном, большей пористостью ВПП.

2. При обработке результатов экспериментов были использованы коэффициент заиления пор фильтра σ_w и приведенный коэффициент σ_w'' . Введено понятие безразмерного времени, которое можно представить как отношение объема суспензии, прошедшей через фильтр за время t , к объему фильтра. При $t = 1$, $T^* = \frac{1 \cdot V}{\delta}$ – безразмерный параметр, тесно связанный со степенью очистки суспензии σ_w'' . Для фильтра ВПП получена экспериментальная зависимость $\sigma_w'' - T^*$, которая может быть использована при прогнозных расчетах фильтра.

3. Распределение осадка по глубине фильтра в отдельные моменты времени можно представить в виде эпор, максимум которых находится в верхней по ходу движения суспензии части фильтра. После нарушения "автомодельности" удельное заиление фильтра стремится к постоянному значению, но заполнение осадком остальной части фильтра продолжается. Можно говорить о критических значениях t_1 , $G_{\text{кр.1}}$ и t_2 , $G_{\text{кр.2}}$ в начале и в конце "автомодельного режима". Для фильтра ВПП получены экспериментальные зависимости $G_{\text{кр.2}} \cdot n - C_0$ при различных значениях σ_w'' .

Распределение σ_w'' по глубине фильтра для элементарных слоев фильтра оказывается таким, что $\sigma_w'' \approx \text{const}$. Это означает, что все элементарные

слои в автоматическом режиме работают с одинаковой нагрузкой, однако во времени элементарные слои работают неодинаково. Получены расчетные формулы для определения σ_w'' при увеличении толщины фильтра.

4. С помощью индикаторного метода экспериментально определены действительные значения пористости заиленного фильтра. По мере заиления фильтра пористость n_3 уменьшается и стремится к предельному значению $n_3 \approx 0.2$. Определение n_3 позволило установить степень заполнения пор осадком ρ , концентрацию твердых частиц в осадке $C_{\text{ос}}$, плотность осадка $\gamma_{\text{ос}}$ и значение $C_{\text{ос}}/C_0$. В автоматическом режиме $C_{\text{ос}}$ мало изменяется, а при нарушении этого режима возрастает и стремится к постоянному значению. Абсолютное значение плотности осадка для суспензии из минеральных частиц $\gamma_{\text{ос}} \approx 1.03 \div 1.05$ г/см³. Таким образом, осадок в порах фильтра, очевидно, представляет собой гелиевую структуру, основную часть которой составляет вода. Но, тем не менее, концентрация твердых частиц в осадке $C_{\text{ос}}$ по сравнению с C_0 в $600 \div 1000$ раз больше.

5. Очистка малоцентрированной суспензии фильтрами ВПП проводилась при $V \leq 3.2$ м/час. При таких скоростях режим фильтрации в фильтре ламинарный и подчиняется закону Дарси. Для описания такой фильтрации была использована модель капиллярно-пористого тела. Сравнение коэффициентов фильтрации, определенных экспериментально и вычисленных по модели, показало, что модель хорошо описывает процесс заиления фильтра только в начальный период при $G \leq 10$ мг/см³. При $G > 10$ мг/см³ опытные значения $K_{\text{ф}}$ больше расчетных по модели, и гипотеза о равномерном распределении осадка вокруг волокон не подтверждается.

Общую зависимость $K_{\text{ф}} = f(G)$ при заилении фильтра ВПП получить не удалось. Но надо отметить, что в каждом отдельном опыте существует зависимость $K_{\text{ф}} = f(G)$ независимо от δ . Поэтому, определив опытную зависимость $K_{\text{ф}} = f(G)$ при тестовых испытаниях фильтра на воде конкретного источника водоснабжения, можно оценить потери давления при прогнозных расчетах фильтра.

6. Разработан метод регенерации фильтра ВПП без его перегрузки. Для этого на постоянную промывочную скорость $V_{\text{пр}} \gg V$ накладывается пульсирующий знакопеременный поток, который создается с помощью пульсаторов давления или скорости. При пульсирующей фильтрации с частотой $n_0 = 1 \div 2$ Гц и максимальной пульсационной составляющей скорости фильтрации, рав-

ной $(1.5 \div 2)V_{пр}$, степень регенерации составляет $90 \div 95\%$. Воздействие пульсации может быть кратковременным, $10 \div 20$ циклов, а весь период промывки длится ≈ 5 минут. Коэффициент полезного действия при регенерации составляет $97 \div 99\%$.

7. Разработанная нами методика исследования кинетики фильтрования при безреагентной очистке может быть использована при изучении реагентной очистки и обезжелезивания воды. Анализ поисковых опытов по обезжелезиванию воды, проведенные нами ранее [9], подтверждает это.

1. Минц Д. М. Теоретические основы очистки воды.– М.: Изд-во литературы по строительству, 1964.– 156 с.
2. Журба М. Г. Очистка воды на зернистых фильтрах.– Львов: Вища школа, 1980.– 200 с.
3. Орлов В. О., Зошук А. М., Мартинов С. Ю. Пенополистирольные фильтры в технологических схемах водоподготовки.– Рівне: РДТУ, 1999.– 143 с.
4. Орлов В. О., Кравченко В. С. Сільськогосподарське водопостачання.– К.: Вища школа, 1992.– 191 с.
5. Белан А. Е., Хорунжий П. Д. Проектирование и расчет устройств водоснабжения.– К.: Будівельник, 1981.– 145 с.
6. Жужиков В. А. Фильтрование.– М.: Химия, 1968.– 410 с.
7. Шехтман Ю. М. Фильтрация малоконцентрированных суспензий.– М.: Изд-во АН СССР, 1961.– 236 с.
8. Пивовар Н. Г., Бугай Н. Г., Фридрихсон В. Л., Кривоног А. И., Кривоног В. В. Дренаж с волокнистыми фильтрами для защиты территорий от подтопления.– К.: Ин-т гидромеханики НАН Украины, 2000.– 332 с.
9. Кривоног О. І. Знезалізнення підземних вод фільтрами з завантаженням з волокнисто-пористого поліетилену // Меліорація і водне господарство.– 2000.– Вып 87.– С. 200–207.
10. Пивовар М. Г., Бугай Н. Г., Фридрихсон В. Л., Кривоног О. І., Кривоног В. В. Фільтр для очищення води. Патент України N 41609 А, Опубл. 17.09.2001. Бюл. N 8
11. Кривоног О. І., Кривоног В. В. Дослідження процесу освітлення води фільтрами з волокнисто-пористого поліетилену // Меліорація і водне господарство.– 1997.– Вып 84.– С. 170–174.
12. Фукс Н. А., Стечкина И. Б. К теории волокнистых аэрозольных фильтров // М.: Докл. АН СССР.– 1968.– Вып 5, N 147.– С. 1144–1147.
13. Пивовар Н. Г., Бугай Н. Г., Рычко В. А. Дренаж с волокнистыми фильтрами.– К.: Наукова думка, 1980.– 214 с.
14. Пивовар Н. Г., Бугай Н. Г., Фридрихсон В. Л., Кривоног А. И., Кривоног В. В. Гидродинамические, физико-механические характеристики и структурные параметры волокнистых дренажных фильтров // Прикладна гідромеханіка.– 2001.– Т. 3(75), N 3.– С. 5–18.
15. Бугай Н. Г. Гидравлическая структура фильтрационного потока в отдельной поре при нелинейной фильтрации // Гидромеханика.– 1974.– N 23.– С. 64–69.
16. Требин Г. Ф. Фильтрация жидкостей и газов в пористых средах.– М.: Гостоптехиздат, 1959.– 153 с.
17. Шейдеггер А. Э. Физика течения жидкости через пористые среды.– М.: Гостоптехиздат, 1960.– 249 с.
18. Мельцер В. З. Изменение геометрических и гидравлических характеристик зернистой пористой среды при ее заиливании // Научн.труды АКХ, Москва, ОНТИ АКХ.– 1970.– Вып. 76, N 7.– С. 23–25.
19. Мельцер В. З. Исследование пористости зернистых фильтрующих материалов // Научн.труды АКХ, Москва, "Водоснабжение".– 1973.– Вып 98.– С. 97–99.
20. Митин Б. А. Исследование насыщения порового пространства и изменения потерь напора при фильтровании // Процессы фильтрования при очистке природных и сточных вод.– Южноуральское изд-во, 1965.
21. Бугай Н. Г., Кривоног А. И., Фридрихсон В. Л. Экспериментальные исследования воздействия вибрации на приток к скважине в напорном пласте // Прикладна гідромеханіка.– 2002.– Т. 4 (76), N 1.– С. 3–11.
22. Mackrle V. L'Etude du phenomene d'adherence Colmatage dans le milieu poroux.– Prage.–1961.
23. Mackrle V. The Theory of Rapid Filtration // International Water Supply Congress.– Barcelona.–1966.
24. Camp T. R. Theory of Water Filtration // Journ. of the San Eng. Div. ASCE.– 1964.– Vol. 90.– N SA4.