

УДК 628.16.067

# КОНТАКТНАЯ РЕАГЕНТНАЯ ОЧИСТКА ВОДЫ ФИЛЬТРАМИ ИЗ ВОЛОКНИСТО–ПОРИСТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

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

*Институт гидромеханики НАН Украины, Киев*

*Получено 20.09.2006*

Приведены результаты экспериментальных исследований контактного реагентного осветления малоконцентрированной тонкодисперсной суспензии фильтрами из волокнисто–пористого полиэтилена (ВПП). Показано, что фильтры из ВПП могут очищать воду не хуже, чем фильтры из песка и пенополистирола (ППС). При этом грязеемкость и продолжительность фильтроцикла для фильтров из ВПП больше. Получены расчетные формулы и графики для расчета фильтров. Приведены примеры расчета фильтра. При контактной реагентной очистке и обезжелезивании воды определены действительная пористость фильтра в процессе его заиливания, степень заполнения пор осадком, концентрация осадка в порах, плотность осадка. Разработан способ регенерации фильтра без нарушения его структуры.

Наведені результати експериментальних досліджень контактного реагентного освітлення малоконцентрованої тонкодисперсної суспензії фільтрами з волокнисто–пористого поліетилену (ВПП). Показано, що фільтри з ВПП можуть очищати воду не гірше, ніж фільтри з піску і пінополістиролу (ППС). При цьому грязьємність і тривалість фільтроциклу для фільтрів з ВПП більше. Отримано розрахункові залежності й графіки для розрахунку фільтра. Наведені приклади розрахунку фільтра. При контактній реагентній очистці і знезалізюванні води знайдені дійсна пористість фільтра в процесі його замулення, ступінь заповнення пор осадом, концентрація осаду в порах, щільність осаду. Розроблено спосіб регенерації фільтра без порушення його структури.

The outcomes of experimental researches of contact reagentive defecation of small-concentrated fine-dispersion of suspension by filters from fibrous–porous polyethylene (FPP) are presented. It is shown, that the filters from FPP can clean water not worse, than filters from sand and frothpolystyrene (FPS). Thus mud–capacitance and duration of filter-cycle for filters from FPP more. The calculated formulas and graphs for calculation of filters are received. The examples of calculation of the filter are presented). At contact reagentive to clearing and dechalybeate of water are defined true porosity of the filter during it silting, degree of fullness of pores by a sediment, concentration of settling in pores, density a settling. The method of regeneration of the filter without disturbance of it's structure is designed.

## ВВЕДЕНИЕ

Проведенные нами ранее исследования безреагентной очистки воды и обезжелезивания грунтовых вод фильтрами из волокнисто–пористого полиэтилена (ВПП) показали, что очистка воды до ПДК (предельной допустимой концентрации) возможна не хуже, чем фильтрами из песка или пенополистирола (ППС). При этом продолжительность фильтроцикла и грязеемкость при использовании ВПП больше.

Известно, что эффективным способом повышения работоспособности песчано–гравийных фильтров при очистке воды является использование реагентной очистки. Для фильтров из ВПП, которые предполагается применять для очистки воды на специальных аппаратах для локального водоснабжения, наиболее целесообразным оказывается применение контактной реагентной очистки. Выполненные исследования показали, что использование реагентов существенно повышает степень очистки фильтрами из ВПП и позволяет, при прочих равных условиях, повысить скорость филь-

трования.

Актуальность проведенных исследований определяется тем, что на основе фильтров из ВПП можно создать простые и эффективные аппараты очистки воды для индивидуальных потребителей или небольших населенных пунктов.

## 1. КИНЕТИКА И ГИДРОДИНАМИКА ОСВЕТЛЕНИЯ. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Результаты исследования безреагентной очистки воды, замутненной механическими частицами диаметром не более 10 мкм при концентрации менее 600 мг/л, показали, что очистка воды до 2÷3 мг/л фильтром из ВПП толщиной 30 см возможна не хуже, чем фильтрами из песка или пенополистирола [1].

При контактной реагентной очистке процесс очистки суспензии ускоряется за счет образования хлопьев в порах фильтра. Как будет показано ниже, параметры, определяющие кинетику и гидродинамику фильтрования при реагентной очистке, количественно существенно отличаются от тако-

вых при безреагентной очистке.

Рассмотрим фильтр из ВПП диаметром  $D$ , толщиной  $\delta$ , диаметром элементарных волокон  $d_{э.в}$ , плотностью фильтра  $\gamma$  и материала волокон  $\gamma_в$ . Скорость фильтрования  $V = \text{const}$ , начальная концентрация механических частиц в воде  $C_o$  и с учетом реагента  $C_{o.p} = C_o + C_p$ , где  $C_p$  – концентрация реагента. Концентрация при выходе из фильтра  $C_{\phi}$ ,  $C_{o.p} - C_{\phi} = \Delta C$ .

При испытании фильтра обычно получают зависимость  $C_{\phi} = f(t)$ . За время  $\Delta t$  концентрация суспензии изменится на  $\Delta C$ , а масса осадка в фильтре – на  $\Delta M$ :

$$\Delta M = \frac{\pi D^2}{4} V \Delta t \Delta C. \quad (1)$$

Тогда коэффициент массового заиления фильтра  $\sigma_w$ , отнесенный к единице объема пор фильтра за единицу времени, будет

$$\sigma_w = \frac{4\Delta M}{\pi D^2 n \delta \Delta t} = \frac{V \Delta C}{\delta n} \quad (2)$$

и

$$\sigma_w'' = \frac{\sigma_w \delta n}{C_{o.p} V} = \frac{\Delta C}{C_{o.p}}, \quad (3)$$

где  $\sigma_w''$  – приведенный коэффициент заиления.

Если массовое заиление фильтра отнести к единице объема фильтра, то получим

$$\sigma_w = \frac{V \Delta C}{\delta} \quad (4)$$

и

$$\sigma_w'' = \frac{\sigma_w \delta}{C_{o.p} V} = \frac{\Delta C}{C_{o.p}}. \quad (5)$$

Так как  $\Delta C/\Delta C_{o.p}$  – степень очистки суспензии, то коэффициент  $\sigma_w''$  имеет двоякий физический смысл: по отношению к поровому пространству фильтра – приведенный коэффициент заиления пор фильтра (3) или фильтра (5), а по отношению к суспензии – степень очистки суспензии.

При фильтровании суспензии при  $V = \text{const}$  для определенного фильтра ВПП ( $d_{э.в}$ ,  $\delta$  и  $n$  – постоянные величины) фильтроцикл можно разделить на три периода по  $t$ : период “зарядки” фильтра  $0 \div t_1$ , когда  $\Delta C$  возрастает от 0 до некоторого значения; период  $t_1 \div t_2$ , когда  $\Delta C \approx \text{const}$ ; период  $t > t_2$ , когда  $\Delta C$  быстро убывает, а  $C_{\phi}$  возрастает и фильтр фактически теряет способность осветлять суспензию.

Если в зависимости (1) разделить  $\Delta M$  на объем пор фильтра  $(\pi D^2/4)\delta n$ , то получим  $\Delta G$  – изменение удельного заиления пор фильтра за время  $\Delta t$ :

$$\Delta G = \frac{V \Delta C}{\delta n} \Delta t$$

и, учитывая выражение (2), получим

$$\Delta G = \sigma_w \Delta t.$$

Для периода работы фильтра  $t_1 \div t_2$ , когда  $\Delta C \approx \text{const}$ ,  $\Delta G = G_{кр.2} - G_{кр.1}$ ,  $\Delta t = t_2 - t_1$ , где индексы 1 и 2 обозначают начало и конец периода, можно записать

$$G_{кр.2} - G_{кр.1} = \frac{V \Delta C}{\delta n} (t_2 - t_1). \quad (6)$$

Обозначив  $\delta/V = t_o$  и  $t/t_o = T$ , где  $T$  – безразмерное время, получим

$$G_{кр.2} - G_{кр.1} = \frac{\Delta C}{n} (T_2 - T_1). \quad (7)$$

Разделив левую и правую части соотношения (7) на  $C_{o.p}$ , получим в безразмерных величинах

$$G' = \frac{G_{кр.2} - G_{кр.1}}{C_{o.p}} = \frac{\Delta C}{C_{o.p} n} (T_2 - T_1) \quad (8)$$

и

$$G' n = \frac{\Delta C}{C_{o.p}} (T_2 - T_1),$$

где  $G'$  – приведенное удельное заиление единицы объема пор фильтра;  $G' n$  – приведенное удельное заиление единицы объема фильтра.

В отношении безразмерного времени  $T$  следует отметить [1], что  $T$  можно интерпретировать как отношение объема профильтровавшейся суспензии за время  $t$  к объему фильтра. Физически это правильно, так как заиление фильтра определяет не время, а объем осветленной суспензии.

При накоплении осадка в фильтре пористость заиленного фильтра  $n_э$  уменьшается, а гидравлическое сопротивление возрастает. Если известно  $n_э$ , то можно определить объем заиленного порового пространства фильтра  $W_{\phi.э}$ , среднюю скорость суспензии в порах  $u$ , концентрацию твердых частиц в осадке  $C_{ос}$ , плотность осадка  $\gamma_{ос}$ , степень заиления пор осадком  $\rho$  по следующим формулам [1]:

$$W_{\phi.э} = \frac{\pi D^2}{4} \delta (n - n_э),$$

$$u = \frac{V}{n_{a.э}},$$

$$C_{oc} = \Delta G \frac{n}{n - n_3},$$

$$\rho = \frac{n - n_3}{n},$$

$$\gamma_{oc} = \gamma_e + \frac{C_{oc}}{\gamma_m} (\gamma_m - \gamma_e), \quad (9)$$

где  $n_{a.з}$  – активная пористость фильтра;  $\gamma_e$  и  $\gamma_m$  – плотность воды и твердых частиц суспензии соответственно. Значение  $\gamma_m$  необходимо определять с учетом плотностей механических частиц суспензии, реагента в твердом веществе и их соотношения в  $C_{o.p.}$

Гидравлическое сопротивление заиленного фильтра при  $V \leq 60$  м/час можно определять по формуле

$$V = K_{ф.з} \frac{H}{\delta},$$

где  $K_{ф.з}$  – коэффициент фильтрации заиленного фильтра;  $H$  – напор на фильтре в м вод.ст.

Определение  $H$  в период  $t_1 \div t_2$  является целью гидравлического расчета фильтра и зависит от  $K_{ф.з}$ . При этом, учитывая неодинаковое послойное заиление фильтра, под  $K_{ф.з}$  следует понимать его среднее значение для фильтра толщиной  $\delta$ .

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ ОСВЕТЛЕНИЯ ПРИ КОНТАКТНОЙ РЕАГЕНТНОЙ ОЧИСТКЕ

### 2.1. Экспериментальная установка и методика исследований

Экспериментальная установка (см. рис. 1) состоит из бака для суспензии или промывной воды 1, оборудованного мешалкой 2, емкости 3 для реагента с дозирующим устройством, пьезометрического щита 4, трубопровода промывной воды 5, трубопровода 6 для подачи суспензии в напорный бачок, напорного бачка постоянного уровня 7, воздухоотделителя (регулятора скорости) 8, переливного трубопровода 9, фильтрационного прибора 10, выполненного из оргстекла в виде цилиндра с внутренним диаметром 140 мм и высотой рабочей части 600 мм. Фильтрационный прибор в своем составе имеет устройство для интенсификации промывки фильтрующей загрузки 11, распределительных систем 12, выравнивающих поток воды

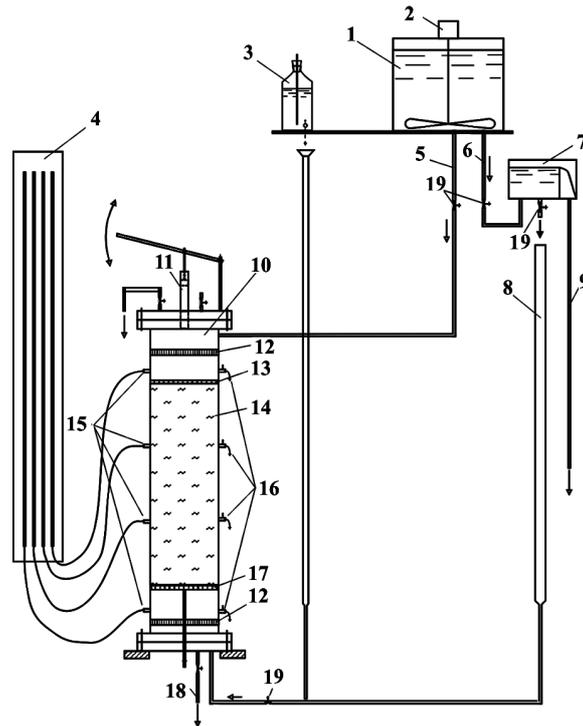


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

во время промывки, опорную сетку 13, фильтрующую загрузку 14, пьезометры 15, пробоотборники 16, прижимное устройство 17. Вода во время промывки сбрасывается в канализацию по трубопроводу 18. Все трубопроводы оборудованы вентилями 19, позволяющими регулировать расход воды через них.

Установка в режиме осветления работает следующим образом: суспензия определенной мутности из бака 1 по трубопроводу 6 подается в напорный бачок 7. Из напорного бачка суспензия попадает в воздухоотделитель (регулятор скорости) 8, который позволяет поддерживать постоянную в течение всего опыта скорость фильтрования. Расход суспензии из напорного бачка регулируется вентилем. Из регулятора скорости суспензия подается на фильтрующую загрузку и осветляется.

Установка работает как контактный осветлитель, с подачей исходной воды и коагулянта в подфильтровое пространство. Ввод коагулянта в исходную воду осуществляется непосредственно перед фильтром. При таком методе коагуляция протекает во много раз быстрее, а доза коагулянта меньше, чем при коагулировании в свободном объеме, так как для контактной коагуляции необходимо лишь снизить агрегативную устойчивость взвешенных веществ, обеспечивая их прилипание

к поверхности. В качестве коагулянта использовался  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , из соли которого приготавливался 0.5÷1.0 % раствор. Определение оптимальной дозы коагулянта при контактном осветлении выполняли по методике, изложенной в [4].

Исходную воду получали путем замутнения глинистыми частицами водопроводной воды с рН, равной 5.8÷6.2, и щелочностью 2.3 мг-экв/л. Характеристика мехсостава замутнителя приведена на рис. 2.

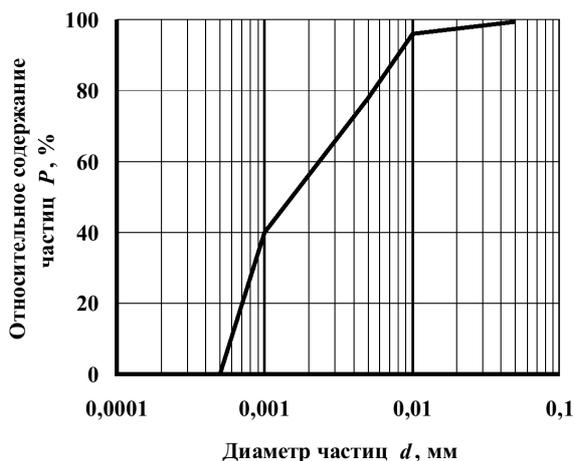


Рис. 2. Характеристика мехсостава глины, используемой как замутнитель

В процессе опыта через определенные промежутки времени из пробоотборников 16 отбирали пробы суспензии и с помощью фотометра ЛМФ-72М.1 определяли их мутность. Пробоотборники расположены равномерно по толщине загрузки через 10 см. Одновременно с отбором проб с помощью пьезометров 15, расположенных в тех же сечениях, что и пробоотборники, фиксировались значения напоров.

Опыты продолжались до нарушения “автомодельности”, на которое указывало заметное увеличение мутности фильтрата.

После этого подача суспензии прекращалась и проводилась промывка. При этом чистая вода из бака 1 по трубопроводу 5 подавалась в надфильтровое пространство перед распределительным устройством 12 и, пройдя загрузку, сбрасывалась в канализацию по трубопроводу 18. Для интенсификации промывки наряду с подачей промывной воды использовали специальное устройство 11.

## 2.2. Результаты экспериментов

Опыты по контактной реагентной очистке были проведены с фильтрами из ВПП. Для некоторых опытов параллельно выполнялись опыты с фильтрами из ППС. В качестве реагента использовался сернокислый алюминий. При обработке результатов опытов определяли  $T$ ,  $G$ ,  $G'$ ,  $\sigma_w$ ,  $\sigma_w''$ ,  $K_\phi$  и строили зависимости  $G - t$ ,  $\sigma_w'' - t$ ,  $K_\phi - t$  и  $H - t$ .

Совместный анализ первых двух зависимостей позволяет определить  $t_1$  и  $t_2$ ,  $G_{кр.1}$  и  $G_{кр.2}$  и соответствующие им значения  $T_1$  и  $T_2$ .

В табл. 1 приведены результаты обработки опытов.

## 2.3. Анализ результатов опытов

*Эффективность работы фильтров из ВПП* оценивалась путем сравнения работы фильтров из ВПП и ППС в одинаковых условиях. Для этого в опытах N 1 и N 2 фильтрование производилось одновременно на двух приборах, в одном из которых был использован фильтр из ВПП, а в другом – из ППС.

Из табл. 1 видно, что в опыте N 1 при  $V = 5$  м/час и  $C_{o.p} = 135$  мг/л степень очистки  $\sigma_w'' = 0.97$  для фильтра из ВПП и в опыте N 1'  $\sigma_w'' = 0.92$  для фильтра из ППС. В опыте N 2 при  $V = 3$  м/час и  $C_{o.p} = 135$  мг/л  $\sigma_w'' = 0.985$  для фильтра из ВПП и в опыте N 2'  $\sigma_w'' = 0.84$  для фильтра из ППС. Такая же тенденция была получена нами и при безреагентной очистке [1]. Параметр  $G_{кр.2n}$  определяет грязеемкость фильтра в конце фильтроцикла. Сравнение фильтров по этому параметру показывает, что в опыте N 1 для фильтра из ВПП  $G_{кр.2n} = 12$  мг/см<sup>3</sup> и в опыте N 1' для фильтра из ППС  $G_{кр.2n} = 2.5$  мг/см<sup>3</sup>. В опыте N 2 для фильтра из ВПП  $G_{кр.2n} = 17.7$  мг/см<sup>3</sup> и в опыте N 2' для фильтра из ППС  $G_{кр.2n} = 10.8$  мг/см<sup>3</sup>. Кроме того, продолжительность фильтроцикла для фильтра из ВПП больше, чем для фильтра из ППС.

Таким образом, эффективность работы фильтров из ВПП несколько лучше, чем фильтров из ППС, которые применяются сейчас для очистки воды [5].

*При анализе графиков  $\sigma_w'' - t$  и  $G - t$*  в одних опытах довольно точно, а в некоторых опытах с небольшим допущением можно выделить три обычных в таких случаях периода: период “зарядки” фильтра  $0 \div t_1$ ; период  $t_1 \div t_2$ , когда  $\sigma_w'' \approx \text{const}$ , зависимость  $G - t$  линейная (“автомодельный режим”) и период  $t > t_2$ , когда  $\sigma_w''$  быстро уменьшается, а линейность  $G - t$  нарушается.

Табл 1. Сводная таблица результатов опытов

NN ОПЫТОВ	$C_o$ , МГ/Л	$C_{o,p}$ , МГ/Л	$V$ , М/ЧАС	$\delta$ , СМ	$\sigma''_w$ ПРИ $t_2$	$T^*$	$G_{кр.1}$ , МГ/СМ <sup>3</sup>	$G_{кр.2}$ , МГ/СМ <sup>3</sup>	$t_1$ , ЧАС	$t_2$ , ЧАС	$T_1$	$T_2$
<b>ВПП, <math>d_{э.б} = 125</math> МКМ, <math>n = 0.77</math>, <math>C_p = 30</math> МГ/Л</b>												
1	105	135	5	30	0.97	16.6	0.5	15	0.5	5.7	8.3	95
<b>ППС, <math>d = 0.4 \div 2</math> ММ, <math>n = 0.36</math>, <math>C_p = 30</math> МГ/Л</b>												
1'	105	135	5	30	0.92	16.6	0.1	7	0.1	1.5	1.7	25
<b>ВПП, <math>d_{э.б} = 125</math> МКМ, <math>n = 0.77</math>, <math>C_p = 30</math> МГ/Л</b>												
2	105	135	3	30	0.985	10	0.5	21	0.3	13	3	130
<b>ППС, <math>d = 0.4 \div 2</math> ММ, <math>n = 0.36</math>, <math>C_p = 30</math> МГ/Л</b>												
2'	105	135	3	30	0.84	10	0.5	30	0.5	10	5	100
<b>ВПП, <math>d_{э.б} = 140</math> МКМ, <math>n = 0.77</math>, <math>C_p = 30</math> МГ/Л</b>												
4	105	135	5	30	0.98	16.6	0.5	7.6	0.3	3	5	50
5	110	140	5	10	0.95	50	0.3	1.5	0.1	0.35	5	17.5
				20	0.975	25	1	9	0.3	2	7.5	50
				30	0.98	16.6	0.5	5.5	0.3	2	5	33
<b>ВПП, <math>d_{э.б} = 100</math> МКМ, <math>n = 0.77</math>, <math>C_p = 30</math> МГ/Л</b>												
6	100	130	5	30	0.97	16.6	0.5	4	0.2	1.5	3.3	25
7	105	135	5	20	0.97	25	0.5	5	0.3	1.5	7.5	38
				30	0.97	16.6	0.5	6	0.3	2.5	5	42
8	105	135	5	10	0.84	50	0.5	2	0.1	0.4	5	20
				20	0.96	25	0.3	3	0.1	0.3	2.5	20
				30	0.98	16.6	0.5	5	0.3	2	5	33
9	110	140	3	10	0.96	30	0.1	4	0.1	1	3	30
				20	0.97	15	0.1	7	0.1	2.7	1.5	40
				30	0.98	10	0.5	10	0.3	6	3	60
10	115	145	3	10	0.97	30	0.5	7	0.3	1.6	9	48
				20	0.98	15	0.5	10	0.3	4	4.5	60
				30	0.98	10	0.5	13	0.3	7.5	3	75
11	105	135	7.6	10	0.96	76	0.5	2.5	0.1	0.5	7.6	38
				20	0.97	38	0.5	5.8	0.2	1	7.6	38
				30	0.98	25	0.5	6.2	0.3	1.5	7.6	38
12	105	135	7.9	10	0.95	79	0.5	1.5	0.1	0.25	7.9	19
				20	0.98	39.6	0.5	5.2	0.2	0.9	7.9	35
				30	0.98	26.4	0.5	6.2	0.3	1.5	7.9	39
<b>ВПП, <math>d_{э.б} = 125</math> МКМ, <math>n = 0.77</math>, <math>C_p = 40</math> МГ/Л</b>												
13	178	218	5	10	0.96	50	0.5	3.7	0.1	0.5	5	25
				20	0.98	25	0.5	5.2	0.1	1	5	25
				30	0.98	16.7	0.5	9.0	0.1	2.25	5	37.5
14	196	236	7.86	10	0.91	78.6	0.1	0.8	-	0.08	-	6.3
				20	0.96	39.3	0.1	3.0	0.1	0.3	3.9	11.8
				30	0.975	26.2	0.1	5.7	0.1	0.87	2.6	22.8
15	170	210	3	10	0.96	30	0.5	5	0.05	0.75	1.5	22.6
				20	0.98	15	0.5	8.8	0.05	2.25	1.5	33.8
				30	0.99	10	0.5	13.5	0.05	5.00	1.5	50.0
<b>ВПП, <math>d_{э.б} = 125</math> МКМ, <math>n = 0.77</math>, <math>C_p = 20</math> МГ/Л</b>												
16	60	80	8	10	0.91	80	0.5	2.5	0.05	0.5	5	40
				20	0.98	40	0.5	5	0.05	1.4	5	56
				30	0.98	26.7	0.5	5.4	0.05	2.75	5	74
17	60	80	3	10	0.97	30	0.5	14.5	0.5	5.0	15	150
				20	0.97	15	0.4	19	0.5	12.5	7.5	187
				30	0.98	10	0.3	23	0.5	22.5	5	225

Табл 2. Сводная таблица результатов опытов (продолжение)

NN опытов	$C_o$ , мг/л	$C_{o,p}$ , мг/л	$V$ , м/час	$\delta$ , см	$\sigma''_w$ при $t_2$	$T^*$	$G_{кр.1}$ , мг/см <sup>3</sup>	$G_{кр.2}$ , мг/см <sup>3</sup>	$t_1$ , час	$t_2$ , час	$T_1$	$T_2$
ВПП, $d_{э.в} = 125$ мкм, $n = 0.77$ , $C_p = 20$ мг/л												
18	60	80	5	10	0.94	50	0.5	12.0	0.25	2.5	12.0	125
				20	0.975	25	0.5	13.5	0.25	5.5	6.2	137
				30	0.98	16.7	0.5	19.5	0.25	11.5	4.1	192
19	59	79	8	10	0.85	80	0.3	7.5	0.1	1.4	8	112
				20	0.95	40	0.3	9	0.2	2.4	8	96
				30	0.97	26.7	1.0	13	0.4	5.0	11	133
20	55	75	5	10	0.94	50	0.15	6	0.1	1.5	5.0	75
				20	0.99	25	0.12	9.5	0.1	4.0	2.5	100
				30	0.99	16.7	0.10	14.5	0.1	9.0	1.7	150

Период “зарядки” фильтра очень часто короткий, а накопление осадка в фильтре  $G_{кр.1}$  незначительное.

Второй период обнаруживается во всех опытах. Для этого периода при  $t_1 \ll t_2$  и  $G_{кр.1} \ll G_{кр.2}$ , учитывая выражения (6) и (8), получим

$$t_2 = \frac{G_{кр.2} \delta n}{\sigma''_w C_{o,p} V}, \quad T_2 = \frac{G'_{кр.2} n}{\sigma''_w}. \quad (10)$$

Эти формулы практически точно отражают результаты экспериментов.

**Анализ графиков  $K_\phi - t$  и  $K_\phi - G$**  показал, что в каждом опыте существует зависимость  $K_\phi - t$ . При этом при увеличении толщины фильтра по ходу движения суспензии  $K_\phi$  возрастает.

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости  $K_\phi - G$  при  $C_{o,p} = 80, 135$  и  $223$  мг/л. Видно, что в каждом случае  $K_\phi$  зависит также от  $V$ . При больших значениях  $V$  больше  $K_\phi$  при одном и том же значении  $G$ . Это говорит о том, что структура осадка в порах разная.

Обобщить полученные результаты пока не удалось. Поэтому графики (см. рис. 3) можно использовать только для фильтра ВПП ( $d_{э.в} = 125$  мкм и  $n = 0.77$ ).

Интересно сравнение зависимостей  $K_\phi - G$  (см. рис. 4) для фильтра из ВПП при контактной реагентной и безреагентной очистке. Видно, что при контактной реагентной очистке при одном и том же значении  $G$  коэффициент фильтрации  $K_\phi$  меньше. Это говорит о том, что при контактной реагентной очистке плотность осадка в порах и пористость заиленного фильтра меньше, чем при безреагентной при одних и тех же  $G$ .

**Распределение осадка и коэффициента фильтрации по глубине фильтра** качественно не отличаются от подобных графиков при безреагентной очистке: большая часть осадка задер-

живается в первом по ходу движения суспензии слое толщиной 10 см. В некоторых опытах к концу “автомодельного режима” основная часть осадка задерживается в первом и втором слоях толщиной 20 см.

Коэффициент фильтрации по глубине фильтра возрастает и к концу “автомодельного режима” изменяется практически по линейному закону. Численное значение коэффициента фильтрации при контактной реагентной очистке значительно меньше, чем при безреагентной очистке.

**Изменение  $\sigma''_w$  по глубине фильтра**, где  $\sigma''_w = \Delta C / C$ ,  $C$  – концентрация суспензии перед слоем,  $\Delta C$  – уменьшение концентрации суспензии в слое, показано на экспериментальных графиках  $\sigma''_w - t$  для отдельных слоев фильтра по направлению движения суспензии (см. рис. 5 и 6).

Анализируя эти графики, отметим следующее. Так же, как и при безреагентной очистке, при контактной реагентной очистке слои фильтра включаются в работу последовательно по направлению движения суспензии. К моменту выхода всего фильтра на “автомодельный режим” наибольшая степень очистки наблюдается в первом слое толщиной 10 см. В остальных нижележащих слоях степень очистки значительно меньше. Но “автомодельный режим” в первом слое быстро нарушается и в работу включается второй и третий слой. При этом максимальная степень очистки во всех слоях примерно одинаковая. Но время существования “автомодельности” разное. В этом смысле слои равномерно нагружены. Высокая степень очистки всего фильтра регулируется автоматически и по величине все время остается несколько больше, чем в отдельных слоях.

**Зависимости  $H - t$** . В большинстве опытов процесс фильтрования по времени доводился до нарушения “автомодельного режима”. В некото-

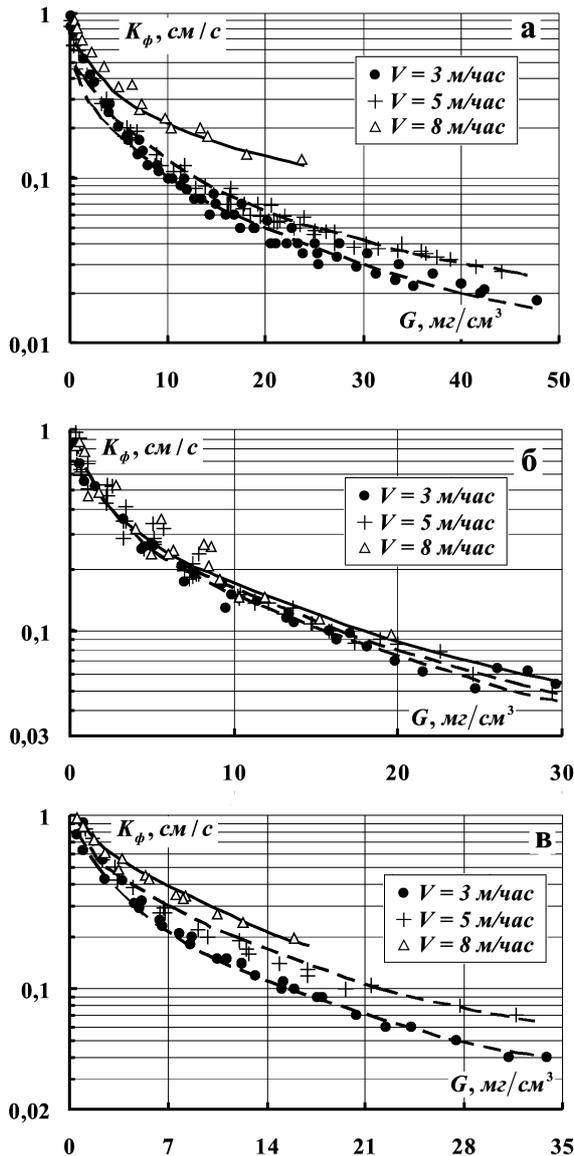


Рис. 3. Экспериментальные зависимости  $K_\phi - G$  при контактной реагентной очистке фильтром из ВПП,  $d_{э.в} = 125$  мкм,  $n = 0.77$ ,  $\delta = 10, 20$  и  $30$  см: а -  $C_{о.р} = 80$  мг/л, б -  $C_{о.р} = 135$  мг/л, в -  $C_{о.р} = 223$  мг/л

рых опытах (N 5 и N 10) фильтрование производилось после нарушения “автомодельности” с целью определения параметров фильтрования при предельном заилении фильтра. Анализ этих опытов показал, что  $K_\phi$  и  $H$  стремятся к постоянному значению, а  $\sigma_w'' \rightarrow 0$ . В “автомодельном режиме” во всех опытах зависимость изменения  $H$  линейная. При этом на оси ординат отсекается отрезок, соответствующий начальному напору при фильтровании чистой воды через чистый фильтр. Так как  $K_\phi$  чистого фильтра из ВПП при  $d_{э.в} = 100 \div$

140 мкм незначительный, начальный напор при  $V = 3 \div 8$  м/час и  $\delta = 10 \div 30$  см не превышает  $2 \div 3$  см вод.ст. При практических расчетах начальный напор можно не учитывать.

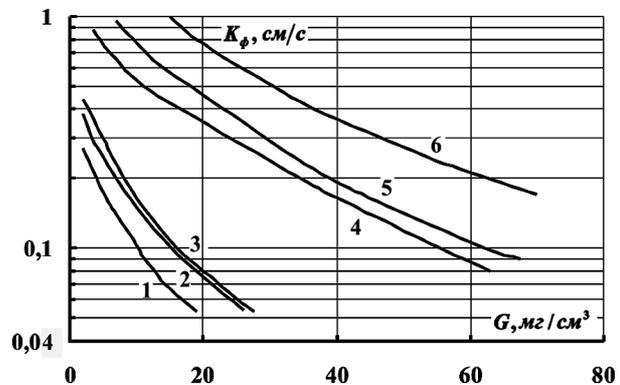


Рис. 4. Сравнение зависимостей  $K_\phi - G$  при контактной реагентной (кривые 1, 2, 3) и безреагентной (кривые 4, 5, 6) очистке фильтром из ВПП,  $d_{э.в} = 125$  мкм,  $n = 0.77$ : 1 -  $C_{о.р} = 80$  мг/л,  $V = 3$  м/час, 2 -  $C_{о.р} = 135$  мг/л,  $V = 3$  м/час, 3 -  $C_{о.р} = 223$  мг/л,  $V = 3$  м/час, 4 -  $C_{о.р} = 105$  мг/л,  $V = 3$  м/час, 5 -  $C_{о.р} = 106$  мг/л,  $V = 1.5$  м/час, 6 -  $C_{о.р} = 195$  мг/л,  $V = 3$  м/час

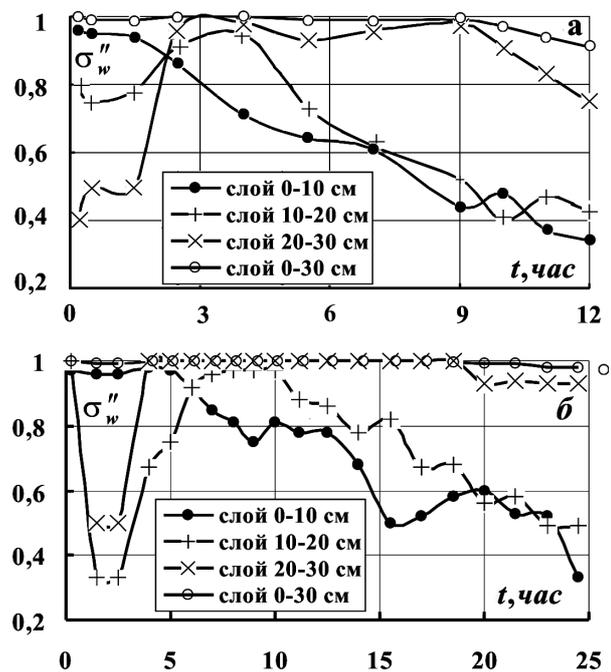


Рис. 5. Экспериментальные зависимости  $\sigma_w'' - t$  для отдельных слоев фильтра из ВПП толщиной 10 см: а - Опыт N 20  $C_{о.р} = 75$  мг/л,  $V = 5$  м/час, б - Опыт N 17  $C_{о.р} = 80$  мг/л,  $V = 3$  м/час

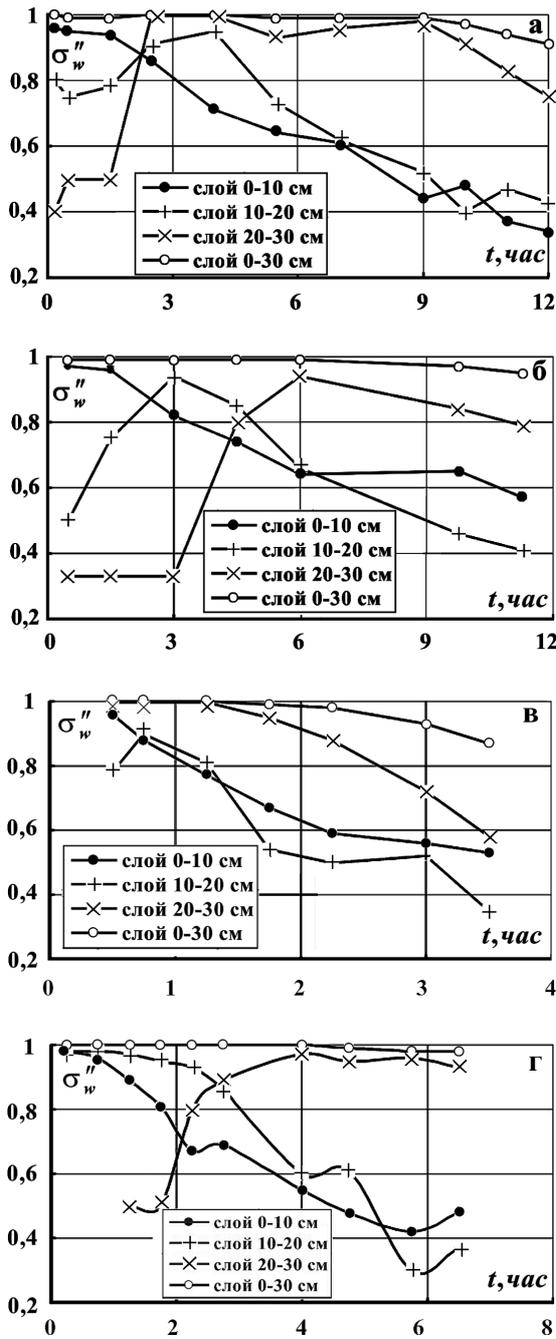


Рис. 6. Экспериментальные зависимости  $\sigma_w'' - t$  для отдельных слоев фильтра из ВПП толщиной 10 см:  
 а - Опыт N 5  $C_{o,p} = 140$  мг/л,  $V = 5$  м/час,  
 б - Опыт N 9  $C_{o,p} = 140$  мг/л,  $V = 3$  м/час  
 в - Опыт N 13  $C_{o,p} = 218$  мг/л,  $V = 5$  м/час,  
 г - Опыт N 15  $C_{o,p} = 210$  мг/л,  $V = 3$  м/час

### 3. СРАВНЕНИЕ КИНЕТИКИ ОСВЕЩЕНИЯ ПРИ БЕЗРЕАГЕНТНОЙ И КОНТАКТНОЙ РЕАГЕНТНОЙ ОЧИСТКЕ

Выше мы отмечали некоторые отличия кинетики фильтрования суспензии через фильтр из ВПП при контактной реагентной и безреагентной очистке. Но наиболее ярко это отличие обнаруживается при построении совмещенного графика  $\sigma_w'' - T^*$ , где  $\sigma_w''$  – степень очистки в “автомодельном режиме”,  $T^* = (1 \cdot V)/\delta$ . На рис. 7 приведены результаты экспериментов. Видно, что при одних и тех же значениях  $T^*$  степень очистки суспензии при контактной реагентной очистке значительно больше, чем при безреагентной. Кроме того, при контактной реагентной очистке степень очистки  $\sigma_w''$  при использовании фильтра из ППС несколько ниже, чем при использовании фильтра из ВПП. Такая же тенденция существует при безреагентной очистке.

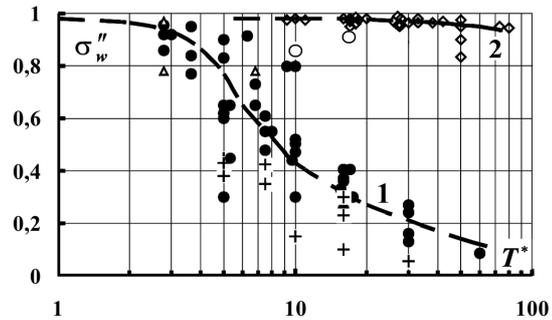


Рис. 7. Экспериментальные зависимости  $\sigma_w'' - T^*$  при фильтровании суспензии через фильтр из ВПП, песка и ППС:  
 1 - безреагентная очистка  
 • - ВПП  $d_{э,в} = 100 \div 125$  мкм,  $\Delta$  - песок  $d_{э,в} = 0.45$  мм,  
 + - ППС  $d = 0.4 \div 2$  мм;  
 2 - контактная реагентная очистка  
 $\diamond$  - ВПП  $d_{э,в} = 100 \div 140$  мкм,  $\circ$  - ППС  $d = 0.4 \div 2$  мм

Графики рис. 7 можно использовать при предварительных расчетах фильтра. Например, если  $C_o = 100$  мг/л и  $C_p = 35$  мг/л, то получим  $C_{o,p} = 135$  мг/л. При ПДК 3 мг/л допустимая степень очистки должна быть

$$[\sigma_w''] \geq \frac{C_{o,p} - \text{ПДК}}{C_{o,p}} = \frac{135 - 3}{135} = 0.975. \quad (11)$$

Из рис. 7 видно, что при контактной реагентной очистке значение  $T^*$  должно быть не более 15. При безреагентной очистке при  $T^* = 15$  степень очистки составляет не более 0.33. Это означает, что для получения воды необходимого качества при безре-

агентной очистке необходимо значительно увеличить толщину фильтра или уменьшить скорость фильтрования.

#### 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ $G_{кр.2}$

На рис. 8 приведены экспериментальные зависимости  $G_{кр.2} - T^*$  для проведенных опытов. Видно,

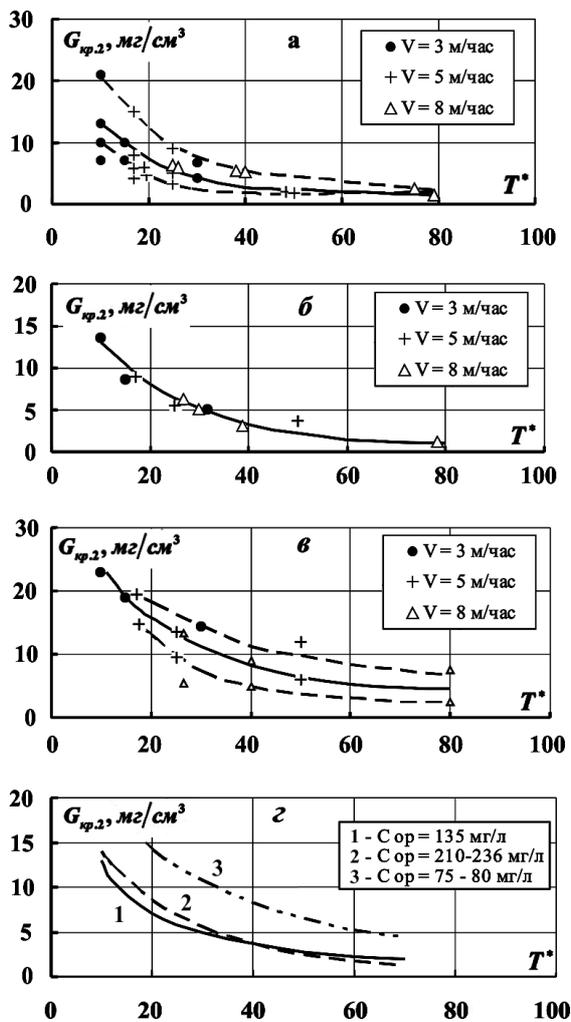


Рис. 8. Экспериментальные зависимости  $G_{кр.2} - T^*$  для фильтра из ВПП,  $d_{э.б} = 125$  мкм,  $n = 0.77$ : а - при  $C_{o.p} = 130 \div 140$  мг/л, б - при  $C_{o.p} = 210 \div 236$  мг/л, в - при  $C_{o.p} = 75 \div 80$  мг/л, г - совмещенный график

что во всех случаях между  $G_{кр.2}$  и  $T^*$  имеет место определенная закономерность: с увеличением  $T^*$  значение  $G_{кр.2}$  уменьшается. Несмотря на разброс опытных точек, считаем возможным выделить кривые средних значений, которые приведены на рис. 8, г. Видно, что при  $C_{o.p} = 130 \div 236$  мг/л зависимости совпадают, но при  $C_{o.p} =$

$= 75 \div 80$  мг/л при одних и тех же значениях  $T^*$  величина  $G_{кр.2}$  больше и может быть описана кривой 3.

#### 5. ПРИМЕРЫ ПРОГНОЗНЫХ РАСЧЕТОВ ФИЛЬТРОВ ИЗ ВПП

Рассмотрим фильтры из ВПП,  $d_{э.б} = 125$  мкм,  $n = 0.77$ . Расчеты выполним при:  $C_o = 50, 75, 100, 150$  и  $200$  мг/л;  $V = 3, 5$  и  $8$  м/час;  $\delta = 30$  и  $50$  см. Количество реагента (сернокислого алюминия) находим по методике, изложенной в [4]. Целью расчета является определение продолжительности фильтроцикла, напора на фильтре и грязеемкости фильтра. Так как “зарядка” фильтра при контактной реагентной очистке происходит очень быстро и  $t_1 \ll t_2$ , в качестве продолжительности фильтроцикла принимаем время  $t_2$ , которое определяем по формуле (10).

В этой формуле  $\sigma_w''$  - степень очистки для заданных параметров фильтрования ( $\delta, V, T^*$ ). Значение  $\sigma_w''$  для каждого расчетного случая определяем по рис. 7, а значение  $G_{кр.2}$  - по рис. 8, г в зависимости от  $T^* = (1 \cdot V) / \delta$ . Допустимое значение  $[\sigma_w'']$  вычисляем по формуле (11), где  $C_{o.p} = C_o + C_p$ , ПДК = 3 мг/л.

По значению  $[\sigma_w'']$  по графику на рис. 7 находим допустимое значение  $[T^*]$ . Условием нормальной работы фильтра является  $\sigma_w'' \geq [\sigma_w'']$  и  $T^* \leq [T^*]$ . В качестве грязеемкости можно использовать заиливание единицы объема фильтра, равное  $G_{кр.2}n$ , а при учете толщины фильтра  $\delta$  - заиливание единицы площади поверхности фильтра  $\delta G_{кр.2}n$ .

Напор на фильтре в конце фильтроцикла определяем по формуле

$$H = \frac{V \delta}{K_\phi}$$

где  $K_\phi$  находим по графикам (см. рис. 3) при  $G = G_{кр.2}$ . Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Такие расчеты необходимо рассматривать как прогнозные. Окончательное решение о режиме фильтрования необходимо принимать после тестовых испытаний на объекте.

#### 6. РЕГЕНЕРАЦИЯ ФИЛЬТРОВ ИЗ ВПП

Регенерацию фильтра из ВПП проводили после окончания опыта поршневым пульсатором, встроенным в верхнюю крышку корпуса фильтра (см. рис. 1), с помощью которого создавали пульса-

Табл 3. Результаты расчетов фильтров из ВПП

$V, \frac{м}{час}$	$C_o, \frac{мг}{л}$	$C_p, \frac{мг}{л}$	$C_{o.p}, \frac{мг}{л}$	$[\sigma''_w]$	$\sigma''_w$	$[T^*]$	$T^*$	$G_{кр.2}, \frac{мг}{см^3}$	$t_2, час$	$G_{кр.2n}, \frac{мг}{см^3}$	$\delta G_{кр.2n}, \frac{мг}{см^2}$	$K_\phi, \frac{см}{с}$	$H, см$ в.ст.
$\delta = 30 \text{ см}$													
3	50	20	70	0.96	0.985	60	10.0	24	26.9	18.5	555	0.045	55
5					0.980		16.6	18	12.3	417	0.070	60	
8					0.975		26.7	12	5.1	280	0.180	37	
3	75	25	100	0.97	0.985	43	10.0	16	12.5	12.3	370	0.085	29
5					0.980		16.6	13	6.1	300	0.130	32	
8					0.975		26.7	8	2.4	186	0.210	31	
3	100	30	130	0.975	0.985	30	10.0	13	7.8	10.0	300	0.122	21
5					0.980		16.6	8	2.9	186	0.190	22	
8					0.975		26.7	5.5	1.3	126	0.250	28	
3	150	35	185	0.98	0.985	15	10.0	13	5.5	10.0	300	0.125	20
5					0.980		16.6	8.7	3.7	201	0.210	20	
8					0.975		26.7	5.7	0.9	132	0.330	20	
3	200	40	240	0.985	0.985	8	10.0	13	4.3	10.0	300	0.130	19
5					0.980		16.6	9.5	1.9	219	0.240	17	
8					0.975		26.7	6	0.6	138	0.420	16	
$\delta = 50 \text{ см}$													
3	50	20	70	0.96	0.985	60	6	25	46.5	19.3	965	0.040	104
5					0.980		10	23	25.8	18.7	935	0.055	124
8					0.975		16	18	12.7	13.9	695	0.140	80
3	75	25	100	0.97	0.985	43	6	20.5	26.8	15.8	790	0.07	60
5					0.980		10	18	14.2	13.9	695	0.09	40
8					0.975		16	13	6.4	10.0	500	0.17	65
3	100	30	130	0.975	0.985	30	6	16	16	12.3	615	0.098	43
5					0.980		10	13	7.9	10.0	500	0.125	55
8					0.975		16	8.5	3.3	6.5	325	0.200	55
3	150	35	185	0.98	0.985	15	6	15.5	11	12	600	0.10	42
5					0.980		10	13.0	5.5	10	500	0.15	46
8					0.975		16	9.2	2.5	7.1	355	0.25	44
3	200	40	240	0.985	0.985	8	6	15	8.2	11.6	580	0.10	42
5					0.980		10	13	4.3	10.0	500	0.18	39
8					0.975		16	10	2.1	7.7	385	0.30	37

ционную составляющую скорости потока, направленного сверху вниз. Скорость потока воды при регенерации была в 20 ÷ 30 раз больше скорости фильтрования. На установившийся фильтрационный поток накладывали пульсацию скорости с частотой  $n_o = 1$  Гц. После прекращения выноса загрязнений из загрузки регенерацию прекращали и определяли  $K_\phi$ .

Оценка степени регенерации фильтра основывалась на экспериментальной зависимости  $K_\phi - G$ , которая была получена при исследовании кинетики фильтрования в каждом опыте. В табл. 4 приведены результаты определения параметров загрузки после регенерации, а на рис. 9 – графики  $K_\phi - G$  для опытов при скорости фильтрования

Табл 4. Результаты определения параметров загрузки после регенерации

$K_{чист.}, \frac{м}{сут}$	$K_\phi, \frac{м}{сут}$	$G_n, \frac{мг}{см^3}$	$G_{ост.}, \frac{мг}{см^3}$
1175	1106	24.72	0.31
1247	1218	25.24	0.10

3.0 и 5.0 м/ч при исходной мутности 135 мг/л.

Определив  $K_\phi$ , по графику  $K_\phi - G$  находили остаточное удельное заиливание пор фильтра  $G_{ост.}$ .

Зная удельное заиливание в начале регенерации  $G_n$ , равное  $G$  в конце опыта на кинетику, определяли степень регенерации фильтра  $\sigma_{рег.}$ :

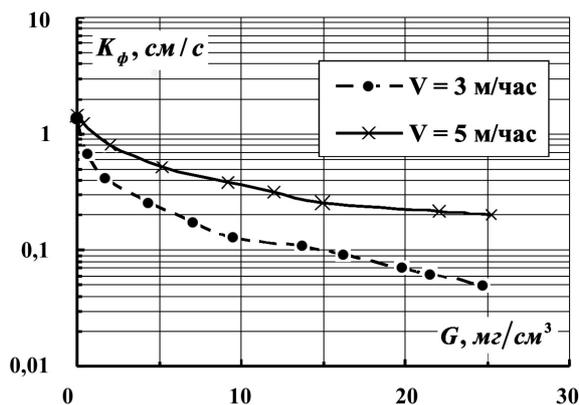


Рис. 9. Экспериментальные зависимости  $K_{\phi} - G$  для фильтра из ВПП  $d_{\partial, \epsilon} = 125$  мкм,  $n = 0.77$

$$\sigma_{рег.} = \frac{G_n - G_{осм}}{G_n} \cdot 100\%.$$

Так, степень регенерации фильтра в одном опыте составила 98.7 %, а во втором – 99.6 %. Это говорит о том, что из загрузки при регенерации вымываются практически все загрязнения и их постепенного накопления происходить не будет.

### 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕЙСТВИТЕЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПОРИСТОСТИ И ПЛОТНОСТИ ОСАДКА В ПОРАХ ЗАИЛЕННОГО ФИЛЬТРА ПРИ КОНТАКТНОЙ РЕАГЕНТНОЙ ОЧИСТКЕ

При исследовании безреагентной очистки суспензии фильтрами из ВПП [1] получена экспериментальная зависимость  $K_{\phi} - n_3$ , где  $n_3$  – пористость заиленного фильтра, которая приведена на рис. 10. Так как при безреагентной и контактной

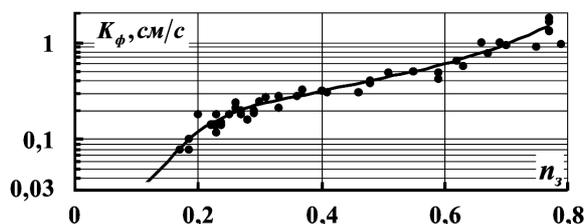


Рис. 10. Экспериментальная зависимость  $K_{\phi} - n_3$  для фильтра из ВПП при безреагентной очистке малоconцентрированной суспензии

реагентной очистке характеристики ( $C_o, C_{o,p}, V$  и  $\delta$ ) фильтра были близкими, принимаем, что зависимость  $K_{\phi} - n_3$  при контактной реагентной

очистке будет такой же, как и при безреагентной. Тогда, при  $C_{o,p} = 135$  мг/л и  $V = 5$  м/час, учитывая зависимости  $K_{\phi} - G$  (см. рис. 3), можно построить зависимость  $G - n_3$  для контактной реагентной очистки (рис. 11). Так как  $G = C_{oc} \rho$  и  $\rho = (n - n_3)/n$ , зная  $G$  и  $n_3$ , определяем  $C_{oc}$  и  $\rho$  и строим зависимость  $C_{oc} - \rho$  (см. рис. 12). Результаты расчетов приведены в табл. 5.

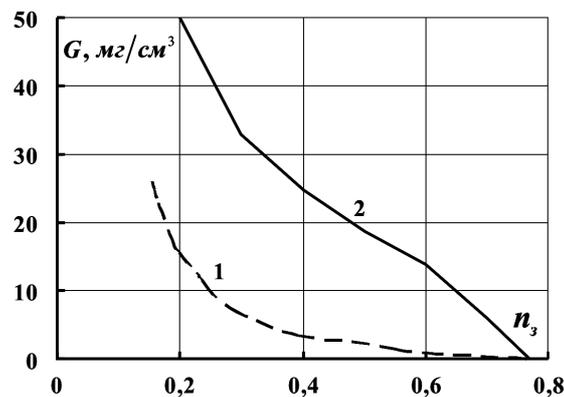


Рис. 11. Экспериментальные зависимости  $G = f(n_3)$  для фильтра из ВПП ( $d_{\partial, \epsilon} = 125$  мкм,  $n = 0.77$ ,  $\delta = 10 \div 30$  мм):  
1 – при контактной реагентной очистке  $C_{o,p} = 135$  мг/л,  $V = 5$  м/час;  
2 – при безреагентной очистке  $C_o = 135$  мг/л,  $V = 5$  м/час

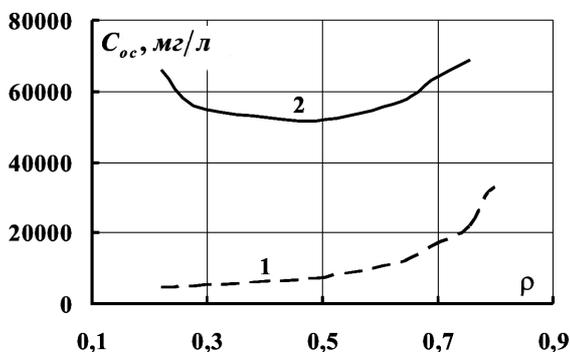


Рис. 12. Экспериментальная зависимость  $C_{oc} = f(\rho)$  для фильтра из ВПП ( $d_{\partial, \epsilon} = 125$  мкм,  $n = 0.77$ ,  $\delta = 10 \div 30$  мм):  
1 – при контактной реагентной очистке  $C_{o,p} = 135$  мг/л,  $V = 5$  м/час;  
2 – при безреагентной очистке  $C_o = 135$  мг/л,  $V = 5$  м/час

Из рис. 12 видно, что при контактной реагентной очистке концентрация твердых частиц осадка в поровом пространстве фильтра  $C_{oc}$  значительно меньше, чем при безреагентной очистке, но по абсолютному значению  $C_{oc} \gg C_{o,p}$ . В нашем случае при  $C_{o,p} = 135$  мг/л отношение  $C_{oc}/C_{o,p} =$

Табл 5. Определение  $C_{oc}$  при контактной реагентной и безреагентной очистках

$K_{\phi}$ , см/с	$n_z$	$G$ , мг/см <sup>3</sup>	$\rho$	$C_{oc}$ , г/см <sup>3</sup>	$C_{oc}$ , мг/л	$G$ , мг/см <sup>3</sup>	$C_{oc}$ , мг/л
контактная реагентная очистка					безреагентная очистка		
0.6	0.60	1.0	0.220	0.0045	4500	14.5	66000
0.5	0.55	1.5	0.285	0.0052	5200	16.0	56000
0.4	0.48	2.5	0.377	0.0066	6600	20.0	53000
0.3	0.39	3.7	0.492	0.0076	7600	25.0	51000
0.2	0.28	7.5	0.635	0.0118	11800	36.0	57000
0.15	0.24	11.0	0.688	0.0160	16000	43.0	63000
0.10	0.19	16.7	0.755	0.0220	22000	52.0	69000
0.07	0.165	23.0	0.785	0.0300	30000		
0.069	0.155	26.0	0.800	0.0330	33000		

=  $33 \div 244$ . Таким образом, при контактной реагентной очистке осадок в порах представляет собой структуру, основной составляющей которой является вода. Плотность такого осадка можно вычислить по формуле (15), где  $\gamma_m$  необходимо определять с учетом плотности частиц суспензии, плотности реагента в твердом состоянии и их соотношения в  $C_{o.p}$ . Например, при плотности минеральных частиц  $2.6 \text{ г/см}^3$ ,  $\gamma_p = 2 \text{ г/см}^3$  при  $C_p = 35 \text{ мг/л}$  и  $C_o = 100 \text{ мг/л}$   $\gamma_m \approx 2.45 \text{ г/см}^3$  и  $\gamma_e = 1 \text{ г/см}^3$ , получим

$$\gamma_{oc} = \gamma_e + \frac{C_{oc}}{\gamma_m}(\gamma_m - \gamma_e) = 1 + 0.59C_{oc}.$$

Для проведенных опытов при контактной реагентной очистке  $C_{oc} = 0.0045 \div 0.033 \text{ г/см}^3$ ,  $\gamma_{oc} = 1.003 \div 1.019 \text{ г/см}^3$ .

## 8. ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЕ ВОДЫ ФИЛЬТРОМ ИЗ ВОЛОКНИСТО-ПОРИСТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

Выполненные нами ранее экспериментальные исследования по обезжелезиванию подземной воды методом упрощенной безнапорной аэрации [7] показали, что фильтрами из ВПП возможна очистка воды до ПДК.

Результаты этих опытов обработаны по методике, изложенной выше, и приведены в табл. 6.

### 8.1. Анализ результатов опытов

Эффективность работы фильтров из ВПП оцениваем, сравнивая работу фильтров из ВПП и ППС, которые работают в одинаковых условиях. Из табл. 6 видно, что по степени очистки  $\sigma''_w$  и  $G_{кр.2n}$  фильтры из ВПП работают несколько лучше, чем из ППС.

Общим недостатком фильтров из ВПП и ППС при обезжелезивании воды является большой период “зарядки” фильтра, который часто сопоставим с периодом их полезной работы ( $t_2 - t_1$ ), когда  $\sigma''_w$  имеет максимальное значение. При практическом использовании фильтров это потребует установки большего количества аппаратов для беспрерывного получения чистой воды в необходимых объемах.

Фильтр из ВПП при  $d_{э.с} = 500 \text{ мкм}$  практически не работает в режиме, когда  $\sigma''_w \approx \text{const}$ , и не может быть использован при обезжелезивании воды при  $V = 9.8 \text{ м/час}$ . При  $V < 9.8 \text{ м/час}$  необходимо провести дополнительные исследования.

Сравнение работы фильтров при обезжелезивании воды с работой при контактной реагентной или безреагентной очистке приведено на рис. 13. Из графиков  $\sigma''_w - T^*$  следует, что для фильтра из ВПП при контактной реагентной (реагент  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) очистке (кривая 2) и при обезжелезивании (реагент  $\text{O}_2$ ) воды (кривая 3) зависимости  $\sigma''_w - T^*$  при  $T^* < 5$  практически совпадают, а при  $T^* > 5$  различие увеличивается, но незначительно. Для фильтров из ППС степень очистки  $\sigma''_w$  для одних и тех же значений  $T^*$  при обезжелезивании заметно меньше.

Полученные зависимости можно использовать при прогнозных расчетах. Например, при обезжелезивании фильтром из ВПП при  $C_o = 10 \text{ мг/л}$  и ПДК  $0.3 \text{ мг/л}$  допустимая степень очистки  $[\sigma''_w]$  должна быть не менее

$$[\sigma''_w] \geq \frac{C_o - \text{ПДК}}{C_o} = \frac{10 - 0.3}{10} = 0.97.$$

Такая степень очистки может быть при  $[T^*] = 10$ . Так как  $T^* = (1 \cdot V)/\delta$ , допустимое значение  $[T^*] = 10$  может быть при следующих значениях  $V$  и  $\delta$ : при  $V = 3 \text{ м/час}$  и  $\delta = 30 \text{ см}$ , при  $V = 5 \text{ м/час}$

Табл 6. Сводная таблица результатов опытов при обезжелезивании воды

№ опытов	Фильтр	$C_0$ , мг/л	$V$ , м/час	$\delta$ , см	$\sigma''_w$	$T^*$	$t_1$ , час	$t_2$ , час	$G_{кр.1}$ , мг/см <sup>3</sup>	$G_{кр.2}$ , мг/см <sup>3</sup>	$G_{кр.2n}$ , мг/см <sup>3</sup>
1	ВПП, $d_{э.б} = 120$ мкм, $n = 0.79$	3.8	4.9	30	0.95	16.3	28	46	1.4	2.7	2.1
1'	ППС, $d = 0.5 \div 3$ мм, $n = 0.36$	3.8	4.9	28	0.88	17.5	26	41	2.6	4.2	1.5
2	ВПП, $d_{э.б} = 120$ мкм, $n = 0.79$	3.5	4.8	30	0.97	16.0	23	53	1.6	3.0	2.4
2'	ППС, $d = 0.5 \div 3$ мм, $n = 0.36$	3.5	4.8	27	0.87	17.8	26	47	2.8	4.9	1.8
3	ВПП, $d_{э.б} = 120$ мкм, $n = 0.78$	6.2	9.4	29	0.96	33.4	8	22	1.7	4.2	3.3
3'	ППС, $d = 0.5 \div 3$ мм, $n = 0.36$	6.2	9.4	31	0.90	30.3	16	28	3.3	7.0	2.5
4	ВПП, $d_{э.б} = 500$ мкм, $n = 0.77$	8.0	9.8	30	0.85	32.7	37	44	6.0	7.5	5.8

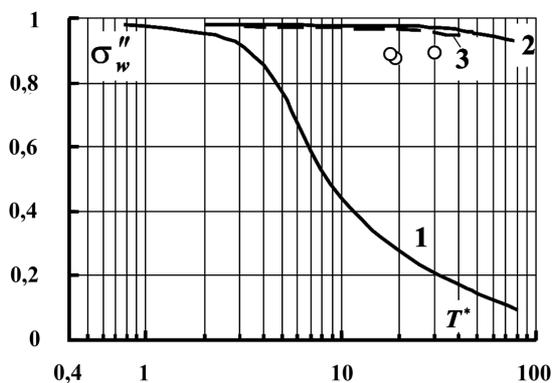


Рис. 13. Экспериментальные зависимости  $\sigma''_w - T^*$  для фильтра из ВПП,  $d_{э.б} = 120$  мкм, и из ППС  $d = 0.5 \div 3$  мм:  
1 – фильтр из ВПП при безреагентной очистке, 2 – фильтр из ВПП при контактной реагентной очистке, 3 – фильтр из ВПП при обезжелезивании, 4 – фильтр из ППС при обезжелезивании (o)

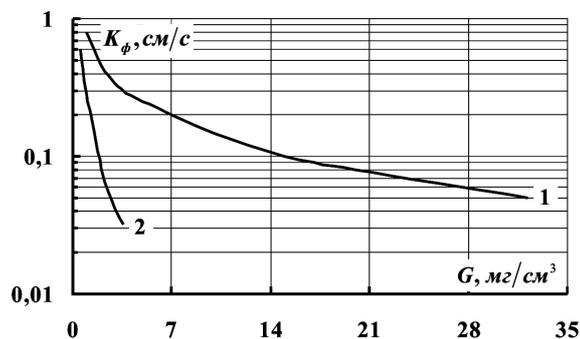


Рис. 14. Экспериментальные зависимости  $K_\phi - G$  для фильтра из ВПП:  
1 – при контактной реагентной очистке, 2 – при обезжелезивании

фильтра при обезжелезивании иная.

**8.2. О действительной пористости и плотности осадка в порах при обезжелезивании**

и  $\delta = 50$  см, при  $V = 7.5$  м/час и  $\delta = 75$  см. Зависимости  $K_\phi - G$  при обезжелезивании и при контактной реагентной очистке приведены на рис. 14. Видно, что при одном и том же значении  $K_\phi$  при обезжелезивании  $G$  значительно меньше. Это говорит о том, что структура осадка в порах

Принимая, что коэффициент фильтрации заиленного фильтра определяется только пористостью  $n_z$  и не зависит от способа заиления фильтра, и используя зависимость  $K_\phi - n_z$  (см. рис. 10), можно построить зависимость  $G - n_z$  при обезжелези-

вании и определить  $\rho$ ,  $C_{oc}$  и плотность осадка в порах  $\gamma_{обж}$ .

Плотность осадка в порах фильтра определялась по формуле

$$\gamma_{обж} = \gamma_{\epsilon} + \frac{C_{oc}}{\gamma_m}(\gamma_m - \gamma_{\epsilon}),$$

где  $\gamma_m = 5.1 \text{ г/см}^3$  (для  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ),  $\gamma_{\epsilon} = 1 \text{ г/см}^3$ .

В табл. 7 приведены результаты вычислений, по которым построены зависимости  $G - n_z$  (рис. 15),  $C_{oc} - \rho$  (рис. 16),  $\gamma_{обж} - \rho$  (рис. 17). Видно, что  $C_{oc}$

Табл 7. Определение  $C_{oc}$  и  $\gamma_{обж}$  при обезжелезивании

$K_{\phi}$ , см/с	$n_z$	$G$ , мг/см <sup>3</sup>	$\rho$	$C_{oc}$ , мг/л	$\gamma_{обж}$ , г/см <sup>3</sup>
0.60	0.60	0.5	0.22	2270	1.0018
0.50	0.55	0.6	0.28	2110	1.0017
0.40	0.48	0.7	0.38	1860	1.0015
0.30	0.39	0.9	0.49	1820	1.0015
0.20	0.28	1.1	0.64	1890	1.0015
0.15	0.24	1.3	0.69	1890	1.0015
0.10	0.19	1.7	0.76	2250	1.0018
0.07	0.17	2.2	0.78	2800	1.0023
0.06	0.16	2.4	0.80	3000	1.0024
0.05	0.15	2.7	0.80	3360	1.0027
0.04	0.13	3.2	0.83	3860	1.0031
0.03	0.12	3.7	0.85	4300	1.0035

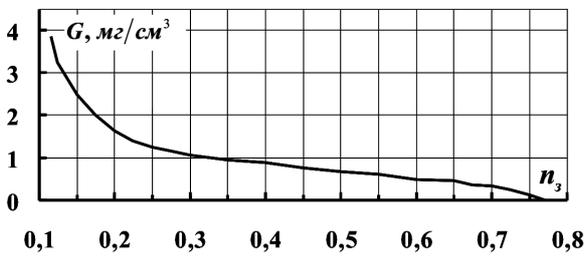


Рис. 15. Экспериментальные зависимости  $G - n_z$  при обезжелезивании

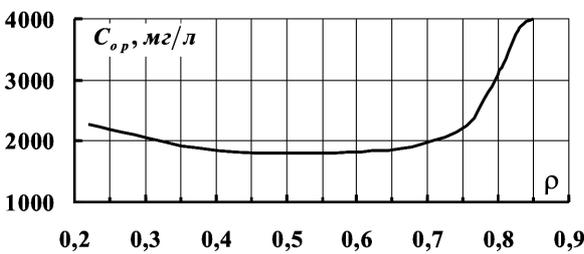


Рис. 16. Экспериментальные зависимости  $C_{oc} - \rho$  при обезжелезивании

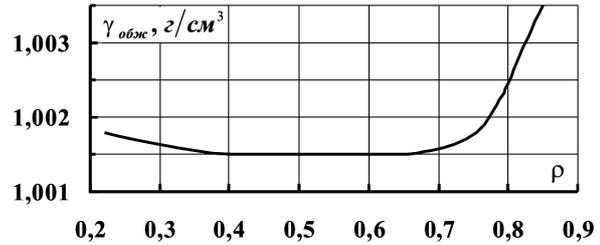


Рис. 17. Экспериментальные зависимости  $\gamma_{обж} - \rho$  при обезжелезивании

в порах значительно больше, чем начальная концентрация соединений железа  $C_o$ , которая была в опытах. В опытах  $C_o = 3.5 \div 8 \text{ мг/л}$  и отношение  $C_{oc}/C_o = 230 \div 1220$ .

Плотность осадка в порах  $\gamma_{обж} = 1.0085 \div 1.0035 \text{ г/см}^3$ . Так же, как при безреагентной и реагентной очистке, при обезжелезивании основную часть осадка составляет вода.

## ВЫВОДЫ

В результате проведенных экспериментальных исследований контактной реагентной очистки малоконцентрированной тонкодисперсной ( $d \leq 10 \text{ мкм}$ ) суспензии фильтрами из волокнисто-пористого полиэтилена ( $d_{э.в} = 100 \div 140 \text{ мкм}$ ,  $n = 0.77$ ,  $C_o = 55 \div 200 \text{ мг/л}$ ,  $V = 3 \div 8 \text{ м/час}$ ) получены следующие результаты.

1. Установка работала как контактный осветлитель при фильтровании снизу вверх. Ввод коагулянта в виде раствора соли серно-кислого алюминия проводился непосредственно перед фильтром. При таком методе коагуляция происходит полнее и быстрее, чем коагуляция в свободном объеме.

2. Получены экспериментальные зависимости степени очистки  $\sigma''_w$  от параметра  $T^*$  фильтров из ВПП и ППС. Определено, что эффективность работы фильтров из ВПП несколько лучше, чем фильтров из ППС. Сравнение безреагентной и контактной реагентной очистки показало, что при контактной реагентной очистке при всех прочих равных условиях степень очистки значительно выше.

3. Получены экспериментальные зависимости  $G_{кр.2} - T^*$ , которые позволяют при известных значениях  $\delta$ ,  $n$ ,  $\sigma''_w$ ,  $V$  и  $C_{o,p}$  определить  $t_2$  по зависимости, приведенной выше. Получены зависимости  $K_{\phi} - G$ , которые могут быть использованы при определении напора на фильтре  $H$  в конце фильтроцикла  $t_2$  при  $G = G_{кр.2}$ . Приведены примеры

расчета.

4. Степень очистки отдельными слоями фильтра изменяется так, что слои включаются в работу последовательно. К моменту выхода всего фильтра на “автомодельный режим” наибольшая степень очистки наблюдается в первом слое толщиной 10 см. В остальных слоях степень очистки меньше. Но “автомодельный режим” в первом слое быстро нарушается, и в работу включаются второй и третий слои. При этом максимальная степень очистки во всех слоях примерно одинаковая, но время существования “автомодельного режима” разное. В этом смысле слои равнонагружены. Высокая степень очистки всего фильтра регулируется автоматически.

5. Напор на фильтре  $H$  в “автомодельном режиме” изменяется по линейному закону, возрастая от начального напора, соответствующего напору при фильтровании воды через чистый фильтр, до напора при  $t_2$ .

При предельном заилении фильтра  $K_{\phi}$  и  $H$  стремятся к постоянному значению, а  $\sigma_w'' \rightarrow 0$ .

6. Получены экспериментальные зависимости  $G - n_3$  и  $C_{oc} - \rho$ . По сравнению с безреагентной очисткой при контактной реагентной очистке при одинаковых значениях  $n_3$  и  $\rho$  значения  $G$  и  $C_{oc}$  меньше, что говорит о различной плотности осадка. Для проведенных опытов  $\gamma_{oc} = 1.003 \div 1.019$  г/см<sup>3</sup>, и в то же время  $C_{oc}/C_{o,p} = 33 \div 244$ .

7. Экспериментально показано, что регенерация фильтра без нарушения его структуры возможна. При этом на промывочный поток сверху вниз со скоростью  $V_{np} = (20 \div 30)V$  необходимо накладывать пульсацию давления с частотой  $1 \div 2$  Гц такой величины, чтобы в фильтре возникала знакопеременная пульсирующая фильтрация. Расчет такого устройства приведен в [1]. При таком методе регенерации степень очистки фильтра может достигать 99 %.

8. Обработка результатов опытов по обезжелезиванию воды фильтрами из ВПП и ППС, выполненных нами ранее [3], с использованием методики [1] показали следующее.

При использовании метода безнапорной аэрации и очистке фильтрами из ВПП и ППС при содержании в воде общего железа  $C_o = 3.5 \div 8$  мг/л,  $V = 5 \div 8$  м/час,  $\delta = 30$  см,  $d_{э.с} = 120$  мкм возможна очистка до ПДК = 0.3 мг/л.

Общим недостатком фильтров из ВПП и ППС при обезжелезивании воды является большой период “зарядки” фильтра, который сопоставим с периодом его полезной работы. При практическом использовании таких фильтров потребуется уста-

новка большего количества аппаратов для бесперебойного получения чистой воды в необходимых объемах.

Сопоставление зависимостей  $\sigma_w'' - T^*$  при обезжелезивании и при контактной реагентной очистке показывает, что при  $T^* < 5$  зависимости совпадают, а при  $T^* > 5$  различие увеличивается, но незначительно. Таким образом, обезжелезивание с предварительной аэрацией воды является реагентной очисткой, где в качестве реагента используется кислород воздуха.

Зависимости  $K_{\phi} - G$  при обезжелезивании и контактной реагентной очистке значительно отличаются: при обезжелезивании при одном и том же значении  $G$  коэффициент фильтрации значительно меньше. Это говорит о том, что структура осадка в порах различная. Действительно, при “автомодельном режиме”  $C_{oc} \approx 2000$  мг/л и  $\gamma_{обэс} \approx 1.0015$  г/см<sup>3</sup>. При этом  $C_{oc}/C_o = 230 \div 1220$ .

9. Разработанная нами методика исследования кинетики фильтрования применима при безреагентной, контактной реагентной очистках и при обезжелезивании воды. Полученные расчетные формулы и экспериментальные графики позволяют провести прогнозные расчеты фильтров из ВПП при проектировании аппаратов локального водоснабжения для отдельных потребителей и небольших населенных пунктов. При этом во всех случаях необходимо осуществлять тестовые испытания фильтров на конкретной воде, которая подлежит очистке, с целью введения необходимых поправок при отработке режима фильтрования.

1. Бугай Н. Г., Кривоног А. И., Кривоног В. В. Безреагентная очистка воды фильтрами из волокнисто-пористого полиэтилена // Прикладна гідромеханіка. – 2004. – 6(78), N 2. – С. 27-43.
2. Минц Д. М. Теоретические основы очистки воды. – М.: Изд-во лит-ры по строительству, 1964. – 156 с.
3. 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.
4. Контактные осветлители для очистки воды / Под ред. Минца Д.М. – М.: Изд-во Мин-ва коммун. хоз-ва, 1955. – 212 с.
5. Орлов В. О., Кравченко В. С. Пінополістирольні фільтри в технологічних схемах водопідготовки. – Рівне: РДТУ, 1999. – 143 с.
6. Николадзе Г. И. Обезжелезивание природных и оборотных вод. – М.: Стройиздат, 1978. – 160 с.
7. Кривоног О. І. Знезалізнення підземних вод фільтрами з завантаженням з волокнисто-пористого поліетилену // Меліорація і водне господарство. – 2000. – Вип. 87. – С. 200-207.