

ПРЕРЫВИСТАЯ РЕАГЕНТНАЯ ОБРАБОТКА ВОДЫ ЭВТРОФИРОВАННЫХ ВОДОЕМОВ НА РАДИАЛЬНЫХ ФИЛЬТРАХ

Выявлены закономерности динамики распределения загрязнений в межзерновом пространстве тонкослойной загрузки радиального фильтра в процессе фильтрования со скоростью на выходе 3 м/ч через слой кварцевого песка толщиной 0,35 м с эквивалентным диаметром 1,19 мм. Прерывистое введение растворов коагулянта и флокулянта способствует повышению адгезионной активности осадка гидроксида алюминия в зернистой среде, упрочнению его структуры, повышению в 1,4-2,8 раз насыщенности порового пространства загрузки.

Введение

Одним из методов рационального использования зернистой загрузки является фильтрование водных суспензий в направлении его убывающей скорости на радиальных фильтрах небольшой высоты [1].

Процесс фильтрования в них осуществляется в режиме планового снижения скорости движения воды от центра к периферии. До настоящего времени широкое внедрение таких фильтров в практику водоподготовки в системах водоснабжения населенных пунктов, промышленных объектов, плавательных бассейнов, речных судов и др. сдерживается отсутствием достаточных результатов исследований по задерживающей способности фильтрующих слоев загрузки.

Результаты наших предыдущих исследований по регулированию адгезионных процессов в зернистой среде позволили экспериментально обосновать возможность использования радиального фильтрования маломутных и малоцветных вод через относительно небольшие по толщине зернистые слои (35...40 см) при внедрении разработанной технологии прерывистого коагулирования и флокулирования устойчивых коллоидных и тонкодисперсных примесей [2, 3].

В.М. Нежлукченко*,

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой гидротехнических сооружений и водоснабжения, Херсонский государственный аграрный университет



Материалы и методы исследования

Эксперименты проводились на модели радиального фильтра, представляющей собой в плане сектор с внешним радиусом $R = 0,4$ м. На расстоянии 0,35 м от распределительной вертикальной трубы была устроена сетчатая перегородка. Боковая стенка фильтра была оборудована 16 пьезометрами. В качестве фильтрующей загрузки использовался кварцевый песок производства ЗАО «Глуховецкий горно-обогатительный каолиновый комбинат» (Украина) с эквивалентным диаметром $d_{экв} = 1,19$ мм и высотой фильтрующего слоя 0,6 м.

Исследовались закономерности распределения осадка в поровом пространстве и задерживающая способность фильтра. Эксперименты проводились в режимах постоянной и прерывистой коагуляции, а также совместной прерывистой коагуляции и флокуляции (рис. 1).

* Адрес для корреспонденции: demagog@inbox.ru, voloshin_nik@mail.ru

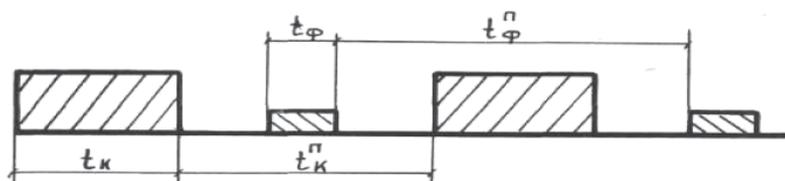


Рис. 1. Схема и параметры прерывистого введения коагулянта и флокулянта: t_k, t_{kn} – время подачи и прекращения подачи коагулянта; $t_\phi, t_{\phi n}$ – время подачи и прекращения подачи флокулянта.

Средняя скорость движения жидкости на расстоянии r от оси распределительной центральной трубы подчинена закону:

$$V_r = V_R \times R \times r^{-1}, \quad (1)$$

где V_R – скорость воды на выходе из фильтра, варьировалась в пределах от 2,7 до 7,4 м/ч; R – внешний радиус фильтра, м.

Предложенные режимы прерывистой коагуляции и флокуляции в одноступенчатых схемах водоочистки с тонкослойными радиальными фильтрами осуществлялись на воде Октябрьского водохранилища (Ингулецкая водопроводная станция, г. Николаев, Украина) и имитатов с добавкой глинистой суспензии. Водоохранилище классифицируется как эвтрофное и находится под активным антропогенным прессингом. Данные, характеризующие качество воды в нем представлены в *табл. 1*.

Вода относится к маломутным и малоцветным водам, с высоким содержанием разнообразного по структуре фитопланктона и органических веществ, которые образовались в результате сложных внутриводоемных процессов. Динамика последних связана с гидробиологическим режимом водохранилища. Перед началом каждого опыта определялось качество исходной воды. В ходе опыта через 0,5...1 ч контролировалась концентрация взвешенных веществ в фильтрате и снимались показания пьезометров, а в конце фильтроцикла – перманганатная окисляемость, цветность, остаточный алюминий и полиакриламид и количество клеток фитопланкто-

Таблица 1

Показатели качества воды Октябрьского водохранилища

№ п/п	Показатели	Единица измерения	Значение
1.	Взвешенные вещества	мг/л	5,6-36
2.	Цветность	град.	15-32
3.	Щелочность	мг-экв/л	1,9-2,96
4.	Жесткость общая	мг-экв/л	5,4-8,4
5.	pH	ед. pH	7,2-8,6
6.	Перманганатная окисляемость	мгO ₂ /л	6,4-13,9
7.	Фитопланктон	ед./см ³	920-8640

на. Специальными исследованиями изучались распределение осадка по высоте фильтрующей загрузки и закономерности отмывания загрязнений в конце фильтроцикла. Было проведено 16 опытов в периоды весеннего и летне-осеннего «цветения» водохранилища.

Продолжительность фильтроцикла определялась по ухудшению качества фильтрата по мутности ($M_\phi \leq 1,5$ мг/л), цветности ($C_\phi \leq 20$ град.) и перманганатной окисляемости ($ПО_\phi \leq 5$ мгO₂/л). После окончания фильтроцикла снимался верхний фланец модели радиального фильтра, устанавливались специальные разделяющие концентрические пластины с криволинейной поверхностью заданного радиуса и осуществлялась послойная выгрузка песка. Измерялся объем каждого слоя загрузки и весовым способом исследовался осадок. После 1 ч отстоя осадка в цилиндре его объем и напряжение сдвига определялись на торсионных весах, оборудованных полированной пластинкой ($F = 2 \times 8 = 16$ см²). По результатам строились графики потерь напора, распределения загрязнений и изменения свойств осадка в радиальном направлении.

Результаты и их обсуждение

Во всех опытах продолжительность фильтроциклов определялась по ухудшению качества фильтрата, в том числе по остаточному алюминию (*табл. 2*).

Потери напора в конце фильтроцикла колебались от 0,248 до 0,626 м, что значительно меньше максимально допустимого напора. Варьирование начального гидравлического уклона i_0 в разных опытах при одинаковой скорости фильтрации явилось следствием выгрузки зернистого материала после каждого опыта, в результате чего происходило случайное перераспределение его в объеме фильтра соответственно структурно-механическим характеристикам.

Стабильность работы фильтра возрастала с уменьшением скорости фильтрования, оптимальные значения которой на выходе из фильтра установлены в пределах от 2 до 3 м/ч. Соответствующая им скорость потока на входе в загрузку составляла 16-24 м/ч. При большей скорости потока на выходе из фильтра толщина фильтрующей загрузки $R - r_0 = 0,35$ м не обеспечивала необходимых степени осветления воды и продолжительности фильтроцикла. Силы взаимодействия хлопьев с поверхностью зернистой загрузки в сложившихся гидродинамических условиях были недостаточными для закрепления

Таблица 2

Результаты исследований основных технологических параметров тонкослойного радиального фильтра

Номер опыта	Параметры дозирования						V_R , М/ч	h_0 , м	i_0	h_{t_3} , м	h_{t_3}/t_3 , М/ч	t_3 , ч	$Al^{3+}_{ост.}$, МГ/Л
	Коагулянт (Al_2O_3)			Флокулянт (ПАА)									
	D_k , МГ/Л	t_k , МИН	t_{kn} , МИН	D_f , МГ/Л	t_f , МИН	t_{fn} , МИН							
1	6,4	-	-	-	-	-	7,4	0,584	1,670	-	-	0,5	-
2	6,4	-	-	-	-	-	3	0,116	0,331	0,566	0,162	3,5	0,41
3	3,2	-	-	-	-	-	3	0,113	0,323	0,469	0,067	7,0	0,26
4	6,4	-	-	-	-	-	2	0,084	0,240	0,248	0,023	10,8	0,32
5	1,6	-	-	-	-	-	3-2,25	0,106	0,303	0,416	0,049	8,5	0,17
6	3,2	10	10	-	-	-	3	0,115	0,329	0,626	0,054	11,6	0,19
7	4,8	10	10	-	-	-	3-2,23	0,126	0,360	0,421	0,065	6,5	0,21
8	3,2	10	10	0,05	2	18	3	0,11	0,314	0,540	0,062	8,7	0,12

Примечание: D_k, t_k, t_{kn} – соответственно доза, время подачи и перерыва подачи коагулянта; D_f, t_f, t_{fn} – соответственно доза, время подачи и перерыва подачи флокулянта; V_R – скорость воды на выходе из фильтра; i_0 – начальный гидравлический уклон; h_{t_3}, h_0 – соответственно величина начальных потерь напора и потерь напора в конце фильтроцикла; t_3 – продолжительность фильтроцикла; $Al^{3+}_{ост.}$ – концентрация остаточного алюминия.

$R - r_0 = 0,35$ м, $t_0 = 22...28$ °С, $M_0 = 30$ мг/л, где R – внешний радиус радиального фильтра; r_0 – радиус распределительной центральной трубы, м; t_0, M_0 – соответственно температура и мутность обрабатываемой воды.

их в поровом пространстве. Кратковременные перерывы подачи коагулянта способствовали повышению продолжительности фильтроцикла на 66 % (сравнивались опыты 3 и 6). Такой эффект объясняется улучшением в межзерновом пространстве адгезионной способности осадка гидроокиси алюминия, вследствие чего повышается его прочность и удельная плотность. Подтверждением этому может служить величина потерь напора в конце фильтроцикла h_{t_3} . Специальными опытами установлено, что увеличение периода прекращения подачи коагулянта отрицательно влияет на стабильность работы радиального фильтра. В фильтрате повышалось содержание взвешенных частиц. Поэтому для данных условий фильтрования величина t_{kp} не должна превышать 10 мин.

Неустойчивую работу фильтра в период отключения подачи раствора коагулянта стабилизовали путем дополнительного импульсного введения флокулянта. Тем более что введение ПАА способствовало образованию крупных агрегатов, которые формировали осадок с высокой степенью струк-

турно-механической гидратации, а также интенсификации роста потерь напора, вследствие чего продолжительность фильтроцикла снижалась на 32 %.

По полученным кривым кинетики осветления установлено, что при обработке воды в режиме постоянной или прерывистой коагуляции период «зарядки» загрузки толщиной 0,35 м колебался в пределах от 5 до 20 мин в зависимости от скорости фильтрования, дозы коагулянта и режима дозирования. Дополнительное импульсное введение флокулянта ПАА дозой 0,05 мг/л способствовало сокращению этого периода и обеспечивало необходимую степень осветления воды. В результате на 5-10 % повышалась эффективность тонкослойного фильтрования за счет увеличения времени защитного действия загрузки в начальный период работы фильтра.



Таблица 3

Изменение грязеемкости и свойств осадка от центра к периферии в загрузке радиального фильтра

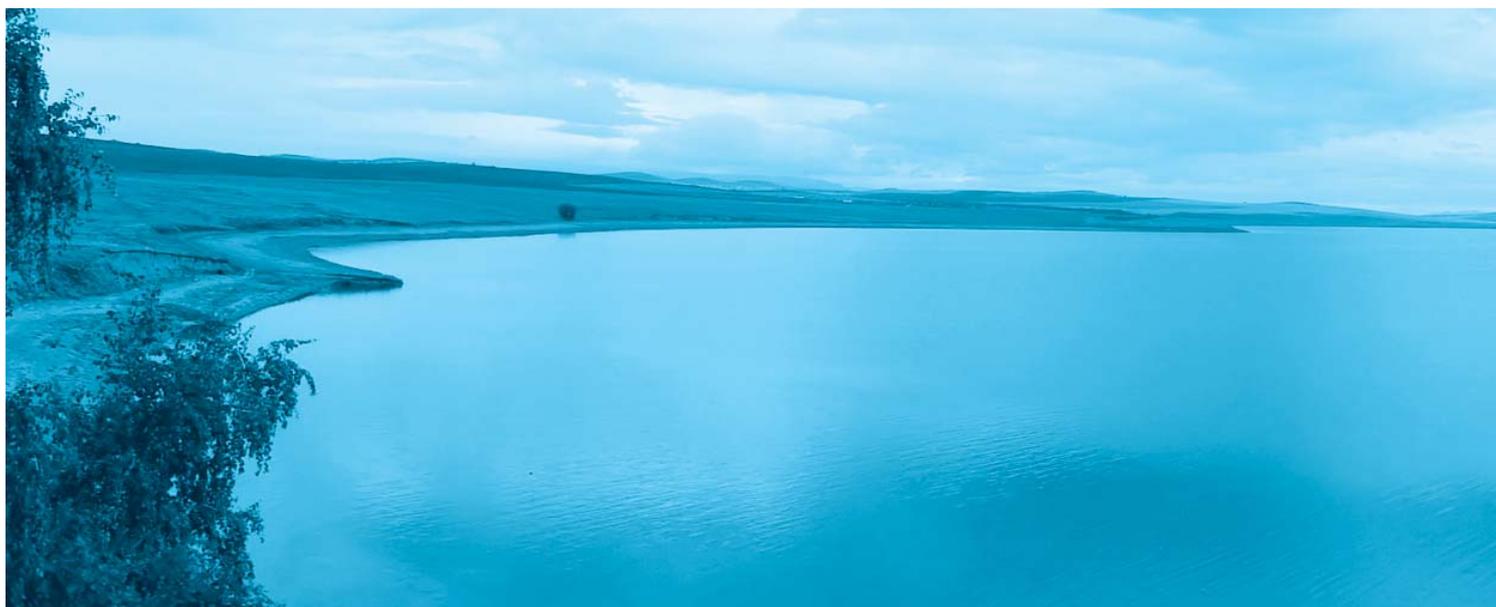
Номер слоя	Расстояние (толщина слоя) $r-r_0$, см	Схема режима дозирования											
		I				II				III			
		γ_1 , г/см ³	$\tau_{сдв}$, мг/см ²	Г		γ_1 , г/см ³	$\tau_{сдв}$, мг/см ²	Г		γ_1 , г/см ³	$\tau_{сдв}$, мг/см ²	Г	
				кг/м ³	м ³ /м ³			кг/м ³	м ³ /м ³			кг/м ³	м ³ /м ³
1	5	0,0142	2,59	3,2	0,227	0,0298	2,97	8,95	0,30	0,0236	4,93	7,61	0,322
2	10	0,0118	2,64	2,0	0,172	0,0283	3,27	3,98	0,14	0,0214	4,77	2,64	0,123
3	15	0,0142	1,65	0,64	0,045	0,0283	3,3	1,96	0,068	0,0191	4,26	1,05	0,055
4	20	0,0138	-	0,093	0,0068	0,0279	3,07	1,32	0,047	0,0193	3,51	0,68	0,035
5	25	-	-	-	-	0,0277	-	0,27	0,010	0,0193	-	0,03	0,002

Примечание: **I** – постоянная коагуляция (*опыт 3, см. табл. 2*); **II** – прерывистая коагуляция (*опыт 6, см. табл. 2*); **III** – прерывистая коагуляция и флокуляция (*опыт 8, см. табл. 2*). Условные обозначения: r – расстояние от оси распределительной центральной трубы до границы слоя, м; r_0 – радиус распределительной центральной трубы; γ_1 – удельный вес осадка; $\tau_{сдв}$ – напряжение сдвига осадка; G – грязеемкость слоя загрузки.

Поскольку интенсификация процесса фильтрования была направлена на повышение степени использования порового пространства загрузки, то интерес представляло изучение закономерностей распределения осадка в радиальном направлении и по высоте фильтра. Результаты влияния способов реагентной обработки на изменение грязеемкости и свойств осадка в радиальном направлении приведены в *табл. 3*.

Изменение грязеемкости в направлении от центра к периферии при разных условиях проведения опытов характеризовалось

общей тенденцией - отложения максимально накапливались в первых слоях и по мере удаления слоя от распределительной трубы их концентрация снижалась по экспоненте. Широкий размах значений грязеемкости по концентрическим сечениям с шагом 5 см объясняется физико-химическими условиями формирования агрегатов до поступления их в загрузку и в первых по ходу движения воды слоях фильтра, а также гидродинамическими факторами, которые способствовали укреплению и уплотнению структуры осадка. Высокая скорость потока в первых слоях обеспечивала интенсификацию коагуляционных процессов, уплотнение осадка в пассивных зонах и узких участках порового пространства. Вид эпюры распределения осадка не зависел от скорости фильтрования, но от ее величины зависели ширина и сдвиг центра тяжести эпюры в направлении потока. За счет уплотнения накопившегося осад-



ка величина сил адгезии в первых сечениях была максимальной, в следующих, по мере удаления от распределительной трубы, она снижалась (*табл. 3*).

Роль первых (толщиной до 20 см) слоёв загрузки относительно задержания суспензии особенно чётко проявлялась в опытах с прерывистой коагуляцией (схема II) и совместной прерывистой коагуляцией и флокуляцией (схема III). В соответствии с данными *табл. 3* до конца фильтроцикла грязеёмкость слоя $r-r_0 = 5$ см в первом случае увеличивалась в 2,8, а во втором – в 2,4 раза по сравнению с режимом постоянного введения коагулянта. При прерывистом введении реагентов плотность и адгезионная способность (по $\tau_{сдв}$) осадка в сечении загрузки на расстоянии $r-r_0 = 20$ см от входа уменьшались, соответственно, на 7-24 и 10-18 %. Объём загрязнений по высоте загрузки радиального фильтра также распределялся неравномерно. Наибольшая грязевая нагрузка присуща средним слоям, что свидетельствует о неоднородности условий коагуляции суспензии по высоте распределительной центральной трубы. На этот процесс влияло как гидростатическое давление, величина которого изменяется по высоте, так и размер первичных коагуляционных структур.

Динамические процессы формирования осадка в объеме загрузки оценивались по результатам исследований потерь напора в процессе фильтрования. Экспериментальные данные опыта 6 приведены в *табл. 2*. Характер изменения кривых потерь напора во времени показал, что фронт осадка перемещался в направлении потока, темп прироста потерь напора всего фильтра определялся в слоях толщиной до 20 см. В период

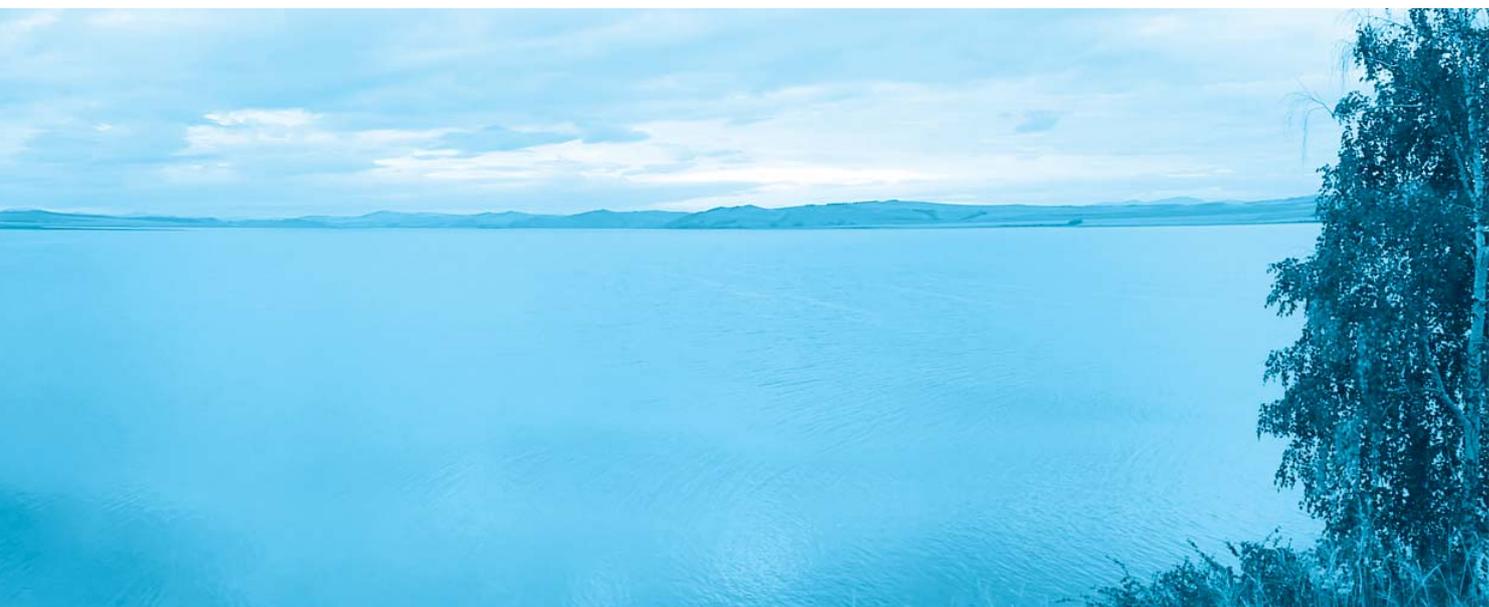
Ключевые слова:

радиальный фильтр,
адгезия,
прерывистая
реагентная
обработка воды

проведения экспериментов нами было акцентировано внимание на перераспределении потерь напора в загрузке, поскольку в определенные моменты потери напора снижались. Так, в анализируемом опыте их снижение произошло после четырех часов фильтрования. Это явление объясняется сдвигом осадка под действием гидродинамических сил и перемещением его в зоны, где условия достаточны для его закрепления. Следует отметить, что в данный момент ухудшения качества фильтрата не наблюдалось.

Дальнейший анализ результатов исследований потерь напора позволил установить закономерности найденного явления. Характер изменения потерь напора неоднозначный как в радиальном направлении, так и по высоте фильтра. В начальный период фильтрования более интенсивно кольматировались нижние слои и по мере их кольматации фронт загрязнений снизу перемещался вверх. Наиболее сложные процессы происходили в слое $r-r_0 = 5$ см. К концу фильтроцикла, продолжительность которого составляла 11,6 ч, в нем замедлялось накопление осадка, происходило уплотнение и массовый сдвиг в следующий слой. Потери напора в слое загрузки между сечениями на расстоянии 5 и 15 см от распределительной трубы со временем возрастали неоднозначно. Основная грязевая нагрузка приходилась на средние и верхние слои фильтра.

Экспериментальная сезонная проверка работы радиального фильтра на воде Октябрьского водохранилища показала высокую эффективность очистки маломутной и малоцветной воды при различных режимах введения растворов коагулянта и флокулянта.



Заклучение

Доказана целесообразность управления физико-химическим процессом осветления фильтруемой суспензии в межзерновом пространстве тонкослойных радиальных фильтров методом прерывистого коагулирования и флокулирования. Величина параметра $t_{\text{кп}}$ должна быть такой, чтобы концентрация суспензии при проскоке в фильтрат не превышала допустимую.

Экспериментальная проверка возможности использования этого способа на тонкослойных радиальных фильтрах позволила определить основные параметры их работы: допустимая максимальная скорость фильтрования на выходе – 3 м/ч, необходимая толщина загрузки – не меньше 0,35 м, диаметр зерен песка – 1,1-1,2 мм, предельные потери напора за фильтроцикл 0,7-0,9 м при продолжительности фильтроцикла 8-12 ч.

Выявлены закономерности динамики распределения загрязнений в межзерновом пространстве тонкослойной загрузки. Основная грязевая нагрузка в радиальном направлении приходится на первые слои, уменьшаясь по экспоненте от центра к периферии; по

высоте фильтра – на средние и верхние слои. Прерывистое введение растворов коагулянта и флокулянта способствует повышению адгезионной активности осадка гидроокиси алюминия в зернистой среде, укреплению его структуры, повышению в 1,4-2,8 раз насыщенности порового пространства первых слоев загрузки.

Литература

1. Журба М.Г., Соколов Л.И., Говорова Ж.М. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений: в 3 т. М.: Из-во АСВ, 2004. 256 с.
2. Нежлукченко В.М. Интенсификация реагентной очистки воды из водохранилищ регулированием адгезионных процессов. Автореф. дис. к-та техн. наук. Нижний Новгород, 1993. 28 с.
3. Журба М.Г. Адгезионные процессы и формирование осадка в зернистых слоях загрузки контактных фильтров / М.Г. Журба, В.М. Нежлукченко // Химия и технология воды. 2008. № 4. С. 444-459.



V.M. Nezhlukchenko

INTERMITTENT CHEMICAL TREATMENT OF WATER WITH RADIAL FILTERS

The regularities of the impurity dynamic distribution in intergranular space in radial filters during filtration (filtration rate - 3 m/h, silica sand depth - 0,35 m, equivalent diameter 1,19 mm) have been analyzed.

Intermittent incorporation of coagulant and flocculant solutions facilitates the adhesion activity of aluminum hydroxide, strengthens its structure and increases up to 1.4 - 2.8 times the saturation of the pore space.

Key words: radial filter, adhesion, intermittent chemical treatment of water.