

Ельшин А.И., Вегера А.И. Выбор фильтровальных материалов для предочистки воды // Материалы, технологии, инструменты. - 2000. - Т. 5 - № 2. - С. 56-60.

УДК 66.067.12

Ельшин А.И., Вегера А.И.

ВЫБОР ФИЛЬТРОВАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРЕДОЧИСТКИ ВОДЫ

Полоцкий государственный университет, ул. Блохина 29, 211440 г. Новополоцк

Резюме

Представлен анализ свойств современных фильтровальных материалов, используемых в технике фильтрования жидких дисперсных сред. Рассмотрены технологические и экономические показатели наиболее распространенных фильтровальных материалов. Предложен алгоритм выбора предфильтра для защиты локальных, мембранных систем очистки воды.

Интенсивно развивающаяся мембранная технология очистки воды, характеризуется высокой эффективностью, низким энергопотреблением и способностью интегрироваться в водные технологии, как промышленности, так и бытовые. Однако данный процесс очень чувствителен к загрязнениям, присутствующим в воде, в частности, к взвешенным веществам. Поэтому существует необходимость защиты мембран от избыточных взвешенных веществ в воде для увеличения их срока службы и поддержания высокой производительности. Предочистка воды, предусмотренная перед использованием высокоэффективной, но дорогостоящей пористой средой (например, фильтром тонкой очистки), или перед мембранным модулем для удаления грубых фракций загрязнений с помощью фильтровальных материалов, имеющих достаточно высокую эффективность, при относительно невысокой стоимости, обладающих возможностью многократной регенерации, позволяет значительно улучшить технико-экономические показатели последних и будет способствовать широкому внедрению мембранной технологии для нужд пищевой промышленности, медицины и быта.

Для разделения дисперсных систем используются самые разнообразные фильтровальные материалы, поэтому выбор фильтрующей среды для решения новой задачи – дополнительной очистки водопроводной воды перед подачей в систему тонкой очистки требует сравнительного анализа и исследования фильтровальных материалов

различных типов, а также собственно кинетики фильтрования, базируясь на технико-экономических и технологических критериях таких, как удельная стоимость, индекс заиливания и др.

При подборе фильтровальных материалов на роль предфильтра для дополнительной входной очистки водопроводной воды необходим учет как технологических, так и затратных показателей, которые находятся в тесной взаимосвязи. С этой целью установим взаимосвязь между относительными технологическими и стоимостными показателями фильтрационных материалов представленных на рынке СНГ и на мировом рынке.

Фильтровальные материалы оценивались по следующим относительным критериям: относительная стоимость \bar{C} , относительная эффективность фильтрования \bar{E} и относительная проницаемость \bar{k} . Здесь эффективность или задерживающая способность по отношению к твердым частицам E может быть выражена равенством: $E = (g' - g'')/g'$, где g' и g'' - содержание твердых частиц в пробах жидкости соответственно до и после фильтровальной перегородки.

Ниже рассматривается разработанный консолидированный критерий для предварительной оценки фильтровальных материалов. При оценке относительных показателей использована 10-ти балльная система [1]. Балл 1 соответствует наименьшей стоимости или наименьшей величине характеристики фильтра, а балл 10 – наибольшей стоимости или величине характеристики фильтра. Например, относительная стоимость вспомогательных фильтрующих веществ (ВФВ), стекловолоконистых и бумажных фильтров характеризуются баллами $\bar{C} = 1 - 2$, а керамических мембран, соответственно баллами $\bar{C} = 8 - 9$. Относительная проницаемость мембран оценена в $\bar{k} = 1 - 2$ балла, а объемных волоконистых фильтров и сеток - $\bar{k} \sim 10$. Так как относительные показатели в каждой группе анализируемых фильтров варьируются в некоторых пределах, то ниже, на рис. 1 и в таблице приведены осредненные величины показателей фильтровальных сред, представленных на рынке СНГ, совместно с показателями, полученными в работе [1]. Как видно из рис. 1, существует общая корреляционная зависимость для совокупности всех данных.

Таблица

Осредненные относительные характеристики различных фильтроматериалов.

Материал	\bar{C}	\bar{E}	\bar{k}	$\omega = \bar{C} / \bar{k}$	\bar{E} / ω
ПТТФ (Трикотаж)	3	6	7	0,43	14,00
Мембраны	7	9	1,5	4,67	1,93

Бумага	1	3	5	0,20	15,00
Ткани	2	4	4	0,50	8,00
Картон	1,3	3	4,5	0,29	10,38
Керамика	7	7	2,5	2,80	2,50
Пористые пластики (ПП)	2	5	8	0,25	20,00
Сетки	2	5	8	0,25	20,00

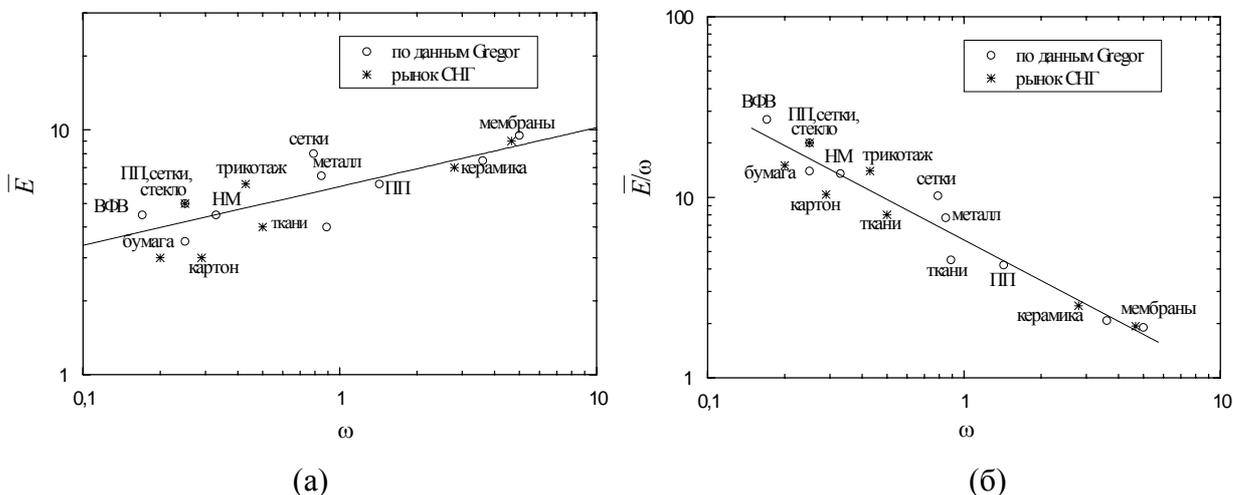


Рис. 1. Зависимость относительной эффективности \bar{E} (а) и комплекса \bar{E}/ω (б) от удельной стоимости проницаемости пористой среды $\omega = \bar{C}/\bar{k}$. Принятые обозначения: ВФВ – вспомогательные фильтровальные вещества; ПП – Пористые пластмассы; НМ – Нетканые материалы.

Между эффективностью \bar{E} и комплексом $\omega = \bar{C}/\bar{k}$ установлена следующая корреляционная связь:

$$\bar{E} = 5,87 \cdot (\bar{C}/\bar{k})^{0,24} \quad (1)$$

Комплекс $\omega = \bar{C}/\bar{k}$ характеризует стоимость единицы проницаемости пористой среды. В свою очередь, $1/\bar{k}$ пропорциональна относительному гидравлическому сопротивлению \bar{R} и, следовательно, критерий $\omega = \bar{C} \cdot \bar{R}$ можно рассматривать как произведение стоимости на энергозатраты (элемент эксплуатационных расходов). Таким образом, увеличение относительной эффективности разделения связано с ростом стоимости и эксплуатационных затрат. Отношение эффективности к относительным затратам \bar{E}/ω характеризует удельную стоимостную эффективность разделения дисперсной системы с помощью той или иной пористой среды: $\bar{E}/\omega = \bar{E} \cdot \bar{k}/\bar{C}$. Чем ниже стоимость материала и выше его проницаемость, при прочих равных условиях, тем выше удельная стоимостная эффективность.

Из корреляционной зависимости, рис. 1 (б), следует, что максимальная эффективность на единицу затрат достигается при использовании ВФВ и бумаги. Тем не менее, данные материалы непригодны в качестве дополнительных фильтров из-за одноразового их использования (нерегенерируемость), а, следовательно, необходимости частой перезарядки фильтра. Однако бумаги и слоистые волокнистые материалы могут быть использованы в качестве входных (контрольных) фильтров систем тонкой очистки. Близко к названным фильтроматериалам на диаграмме располагаются трикотажные материалы, что делает их весьма привлекательными для использования, так как помимо высокой эффективности, низкой стоимости они обладают рядом технологических достоинств: высокая прочность, хорошая регенерируемость, химическая стойкость, низкое гидравлическое сопротивление [2-4]. Эти фильтры представляют собой трикотаж повышенной толщины, поверхностного и объемного заполнения. Они занимают промежуточное положение между объемными и поверхностными фильтрами. По сравнению с тканями, трикотажные фильтры имеют более низкую стоимость единицы проницаемости. Это указывает на перспективность применения трикотажных фильтровальных материалов в качестве материала для предфильтра.

По другую сторону графика располагаются полупроницаемые мембраны и мембранные микрофильтры. Они обладают высокой эффективностью и стоимостью, но низкой проницаемостью. Вследствие этого, эффективность единицы затрат на мембраны и мембранную очистку мала. Поэтому мембранные микрофильтры рекомендуется использовать только для финишной очистки жидкостей.

При разделении систем с широким спектром дисперсных частиц, и при необходимости высокой степени разделения, перед использованием высокоэффективной пористой среды (например, мембран) экономически целесообразным является предварительное удаление грубых фракций с помощью фильтровальных материалов, имеющих более высокую эффективность, приходящуюся на единицу затрат.

Предфильтр должен представлять компромисс между высокой проницаемостью (как минимум на порядок выше фильтра тонкой очистки) и достаточной тонкостью фильтрования. Высокая проницаемость предполагает возможность установки предфильтра без значительного изменения гидравлического режима системы тонкой очистки.

Для зернистого слоя, состоящего из частиц различного размера, эквивалентный диаметр d_e определяется соотношением

$$d_e = \frac{2}{3} \cdot \frac{\varepsilon \varphi d_{av}}{(1-\varepsilon)}, \quad (2)$$

где $d_{av} = \sum_i \frac{x_i}{d_i}$ – средний диаметр зерен в слое; x_i – объемная или массовая доля частиц i -той фракции с размером d_i ; φ – фактор формы, который для сферических частиц равен 1,0.

Согласно закону неразрывности средняя скорость в поровом канале длиной $l = l_0$, где l_0 – толщина пористого слоя, больше скорости в свободном сечении аппарата w в $1/\varepsilon$ раз и равна w/ε . Для канала длиной $l > l_0$ можно ввести понятие извилистости $T = l/l_0$, тогда с учетом извилистости связь между средней скоростью течения жидкости в поровом канале и ее проекцией на направление движения общего потока будет [5, 6]

$$w_{av} = wT / \varepsilon, \quad (3)$$

Подстановка (2) и (3) в уравнение для средней скорости w_{av} дает:

$$w = \frac{\varepsilon}{T} \cdot \frac{\varepsilon^2 \varphi^2 d_{av}^2}{72\mu(1-\varepsilon)^2} \cdot \frac{\Delta p}{l}. \text{ С учетом градиента давления в направлении основного потока}$$

$$[5] \frac{\Delta p}{l_0} \cdot \frac{l_0}{l} = \frac{\Delta p}{l_0 T} \text{ получаем в окончательной форме:}$$

$$w = \frac{\varepsilon^3 \varphi^2 d_{av}^2}{36\mu K_0 T^2 (1-\varepsilon)^2} \cdot \frac{\Delta p}{l_0} = k \cdot \frac{\Delta p}{\mu l_0}. \quad (4)$$

Уравнение (4) носит название уравнения Козени-Кармана. Здесь k – коэффициент проницаемости или проницаемость (аналог константы скорости), а K_0 – коэффициент зависящий от формы поперечного сечения канала. В большинстве случаев можно принять $K_0 = 2$ [7]. Проницаемость материала включает структурные характеристики пористого тела и, как будет показано ниже, широко используется в моделях фильтрования дисперсных систем.

Как это видно из уравнения Козени-Кармана (4) и (2), высокая проницаемость связана с высокой пористостью и большим размером пор.

На рис. 2 пунктирной линией и стрелкой обозначена область выбора предфильтра исходя из требований по проницаемости k , ниже которой по проницаемости находятся фильтры тонкой очистки. Кривыми 1-3 на рис. 2 представлена зависимость проницаемости k фильтровального материала от диаметра пор d_e и пористости ε рассчитанных из уравнений (4) и (2). В расчетах фактор формы принят равным $\varphi = 1$, а коэффициент извилистости $T = 1/\varepsilon^{0.5}$ [8, 9]. Точками на рисунке обозначены экспериментальные значения k и d_e , измеренные для фильтроматериалов, попадающих в область выбора предфильтров: 1). Глубинные фильтры производства Гомельского института металлокерамических систем им. В.А. Белого, получаемые из термопластичных полимерных материалов (Гомель-нетканый материал (ГН), Гомель-патрон (ГП) – материал полиэтилен). 2). Поверхностные фильтры – полиэфирные сетки БГУ и БГУ-2, хлопчатобумажный тканевый фильтр Бельтинг. Фильтровальные вискозные и полиэфирные сетки разработаны и производятся в НИИ физико-химических проблем Белорусского государственного университета. В дальнейшем – БГУ и БГУ-2 соответственно. Фильтровальная хлопчатобумажная ткань Бельтинг является типичным фильтром, широко применяемым в технике разделения суспензий, производится в Российской Федерации [10]. Тонкость фильтрации Бельтинг составляет 25 мкм [11]. 3). Лавсановый трикотажный фильтр ПТТФ - новое перспективное лавсановое трикотажное полотно [12, 13], разработанное в Республике Беларусь в Витебском государственном технологическом университете с использованием в качестве сырья волокон производимых в республике. ПТТФ имеет низкое гидравлическое сопротивление и хорошо зарекомендовал себя при фильтровании различных дисперсных сред [2]. По своим характеристикам материалы типа ПТТФ не уступают зарубежным аналогам [14].

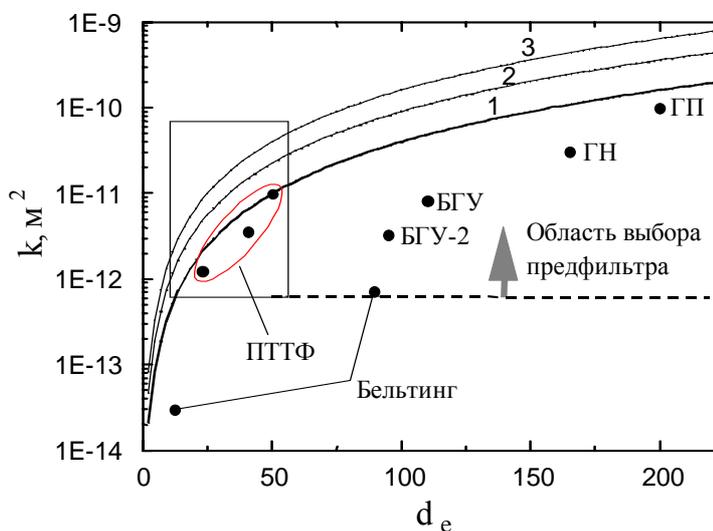


Рис. 2. Зависимость проницаемости фильтровального материала от диаметра пор и пористости. Кривая 1 — $\varepsilon = 0,4$; 2 — $\varepsilon = 0,6$; 3 — $\varepsilon = 0,8$. Точками на рисунке указано положение фильтроматериалов, попадающих в область выбора предфильтров. Область, ограниченная прямоугольником относится к компромиссным вариантам материала предфильтра. Ткань Бельтинг представлена в двух состояниях: до набухания (верхняя точка) и после длительного пребывания в воде.

Ниже приведены другие параметры фильтровальных материалов, необходимые для выбора оптимального предфильтра.

Важным параметром предфильтра является его пригодность к многократной регенерации. Регенерацией называется восстановление эксплуатационных свойств фильтровальных материалов с целью повторного их использования [15]. Регенерация фильтровальной перегородки, как правило, проводится после снижения ее проницаемости на 75% и ниже от первоначальной. Для мембран регенерацию проводят в некоторых случаях уже при снижении производительности на 10-15% от первоначальной [16].

При многократном повторении процесса фильтрация - регенерация сопротивление фильтровальной перегородки $R_{\phi,n}$ зависит от числа циклов n процесса. При регенерации обратным током жидкости зависимость может выражаться степенной функцией [17]:

$$R_{\phi,n} = R_0 \cdot n^b, \quad (5)$$

где R_0 - начальное сопротивление фильтровальной перегородки; b - эмпирический коэффициент.

Удельная грязеемкость G определялась как отношение массы задержанного на фильтре осадка m_{oc} к удельному объему фильтрата q :

$$G = m_{oc} / q. \quad (6)$$

Средняя производительность или объемный расход фильтрата w_{cp} рассчитывалась как отношение полученного удельного объема фильтрата q к времени процесса фильтрации t :

$$w_{cp} = q / t. \quad (7)$$

Надежность T_n фильтра определялась как произведение удельного объема фильтрата q и времени процесса фильтрования t :

$$T_n = q \cdot t. \quad (8)$$

Для анализа энергозатрат в процессе фильтрования рассмотрим такую характеристику процесса фильтрования как мощность:

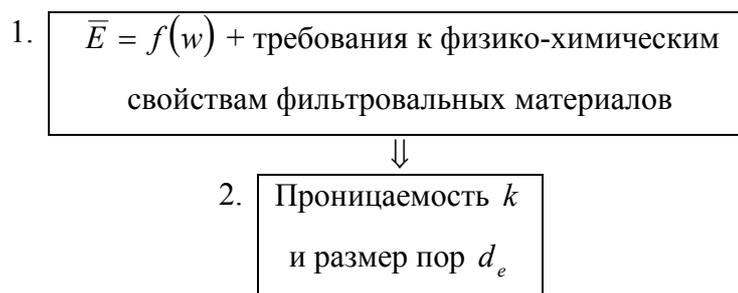
$$N_n = w_{cp} \cdot \Delta p, \quad (9)$$

где w_{cp} - средний объемный расход фильтрата.

При постоянном перепаде давления мощность прямопропорциональна расходу фильтрата. Учитывая разную задерживающую способность и проницаемость фильтровальных сред по этому показателю, сложно характеризовать сам процесс фильтрования. Поэтому рассмотрим отношение средней мощности фильтрования к грязеемкости фильтровальной среды $N_n/G = N_n q/m_{oc}$, показывающее величину затрат энергии, приходящуюся на единицу массы задержанного вещества или энергозатраты, приведенные к грязеулавливающим свойствам фильтровальной среды.

Алгоритм выбора предфильтра

Исходя из вышеизложенного, выбор оптимального предфильтра представляет собой многопараметрическую задачу, согласно которой, предфильтр должен удовлетворять определенной сумме требований. Поскольку данная задача не имеет аналитического решения и представляет собой ряд последовательных приближений в поиске компромиссного решения, был разработан алгоритм выбора предфильтра в виде последовательного решения ряда задач (рис. 3).



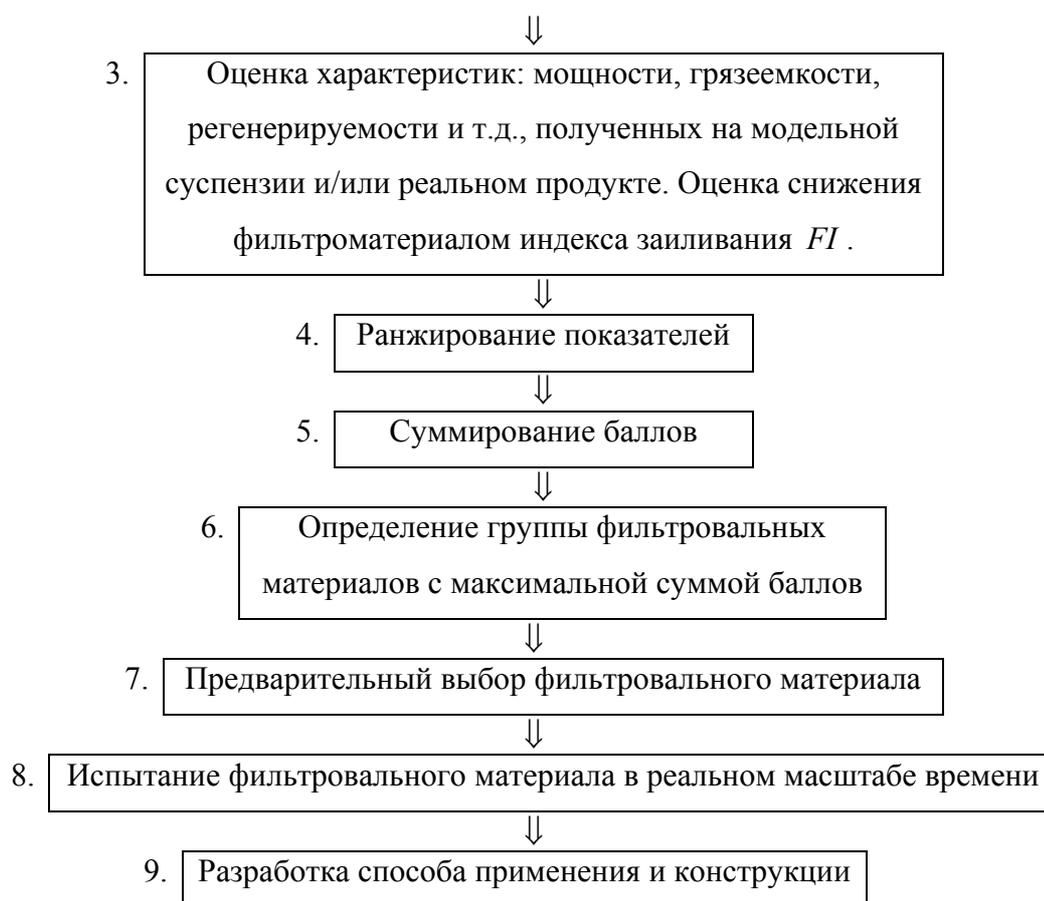


Рис. 3. Алгоритм выбора префильтра.

На первом этапе исходя из консолидированного критерия для предварительной оценки фильтровальных материалов, а также требований к их физико-химическим свойствам, первично выбирается группа материалов для исследований на возможность применения в качестве префильтра. На втором этапе сравниваются проницаемость k и размер пор d_e выбранных фильтроматериалов, и определяется область компромиссных значений k и d_e , в которой находятся фильтроматериалы наиболее приемлемые для использования в качестве префильтра. Далее (этап 3) фильтровальные материалы оцениваются по таким параметрам, полученным на модельной суспензии и/или реальном продукте, как: проницаемость; средний размер пор; гидравлическое сопротивление; стоимость; грязеемкость; средняя производительность; отношение средней мощности фильтрования к грязеемкости; качество фильтрата; регенерируемость; снижение индекса заиливания FI (SDI) [18]; результаты исследования фильтроматериала на модельной суспензии.

Затем следует ранжирование показателей. Оценка параметров производится по бальной системе: при хорошем значении параметра фильтроматериалу присваивается “1”

балл, удовлетворительном – “0” баллов и неудовлетворительном – “-1” балл. Полученные таким образом баллы суммируются, и определяется группа фильтровальных материалов с их максимальной суммой, из которых и делается предварительный выбор фильтровального материала для испытаний в реальном масштабе времени и реальном продукте (условиях процесса). Заключительным этапом следует окончательный выбор фильтровального материала для использования в качестве предфильтра, разработка способа применения и конструкции предфильтра.

Согласно описанному выше алгоритму, материалы типа ПТТФ набрали максимальную сумму баллов и, таким образом, являются наиболее предпочтительными для использования в качестве предфильтра для защиты локальных, мембранных систем очистки воды. Последующие исследования по фильтрованию водопроводной воды с содержанием взвешенных веществ 10-12 мг/л с применением ПТТФ и других вышеназванных материалов подтвердили наибольшую эффективность выбранного трикотажного материала.

Выводы

На основании сформулированных основных требований к предфильтрам установлено, что в качестве предфильтров для мембран и фильтров тонкой очистки, работающих по схеме прямого подключения к водопроводной сети, необходимо использовать материалы, обладающие высоким соотношением эффективности фильтрования и стоимости единицы проницаемости фильтроматериала, высокой грязеемкостью, химической стойкостью, низким гидравлическим сопротивлением и пригодностью к многократной регенерации.

Основываясь на разработанном алгоритме выбора материала предфильтра, в качестве предфильтра, при исходной концентрации взвешенных веществ в водопроводной воде 10-12 мг/л, рекомендован многослойный трикотажный материал ПТТФ, структура которого складывается из текстурированных лавсановых волокон, упакованных посредством их провязки. Фильтровальные материалы такого типа представляют собой трикотаж повышенной толщины, поверхностного и объемного заполнения и выпускаются, в частности, на экспериментально-опытном предприятии ВГТУ (ЭОП ВГТУ) с использованием в качестве сырья волокон производимых в Республике Беларусь.

Обозначения

\bar{C} - относительная стоимость;

\bar{E} - относительная эффективность фильтрования;

\bar{k} - относительная проницаемость;

E - эффективность или задерживающая способность по отношению к твердым частицам;

g' и g'' - содержание твердых частиц в пробах жидкости соответственно до и после фильтровальной перегородки;

ω - удельная стоимость проницаемости пористой среды;

\bar{R} - относительное гидравлическое сопротивление;

d_{av} - средний диаметр зерен в слое, м;

x_i - объемная или массовая доля частиц i -той фракции с размером d_i ;

φ - фактор формы;

l - длина порового канала, м;

l_0 - толщина пористого слоя, м;

w - скорость в свободном сечении аппарата, м/с;

w_{av} - средняя скорость фильтрования, м/с;

k - коэффициент проницаемости или проницаемость, м²;

K_0 - коэффициент из уравнения Козени-Кармана;

d_e - эквивалентный диаметр пор фильтровального материала, м;

ε - пористости фильтровального материала, м³/м³;

T - коэффициент извилистости (извилистость), м/м;

$R_{\phi.n}$ - сопротивление фильтровальной перегородки, м⁻¹;

n - число циклов процесса фильтрования;

R_0 - начальное сопротивление фильтровальной перегородки, м⁻¹;

b - эмпирический коэффициент;

G - удельная грязеемкость, кг/м;

m_{oc} - масса задержанного на фильтре осадка, кг;

q - удельный объем фильтрата, м³/м²;

t - времени процесса фильтрования, с;

T_n - надежность фильтра, м³с/м²;

N_n - мощность процесса фильтрования, Вт/м²;

w_{cp} - средний объемный расход фильтрата, м/с;

FI - индекс заиливания (Fouling Index), %/мин.

Литература

1. Gregor, E.C. Filtration and Separation considerations in the selection of media for process application // *Advances in Filtration and Separation Technology*, Ed.R.W.Peters, Cahners Publ.Co., Des Plaines, IL, USA - 1992. - Vol. 6. - P. 29-33.
2. Ельшин А.И., Путинцев С.А., Петрова В.А. и др. Применение трикотажных материалов в качестве фильтровальных элементов для разделения суспензий // *Химическая промышленность*. - 1989. - N 2. - С. 137-138.
3. А.с. 1378893 (СССР). МКИ В 01 D 39/08. Фильтровальный материал для суспензий / В.А. Петрова, М.А.Коган, А.И.Ельшин.- Заявл. 04.06.83. Бюл. N 9, 1988.
4. А.с. 1503863 (СССР). МКИ В 01 D 3/32. Фильтрующий материал для суспензий / В.А. Петрова, М.А.Коган, А.И.Ельшин и др.- Заявл. 10.11.87. Бюл. N 32, 1989.
5. Bear, J. *Dynamics of Fluids in Porous Media*, Amer. Elsevier Publishing Co., 1972. - p. 90-118.
6. Громогласов А.А., Копылов А.С., Пильщиков А.П. *Водоподготовка: процессы и аппараты*. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 272 с.
7. Аэров М.Э., Тодес О.М. *Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем*. – Л.: Химия, 1968. – 512 с.
8. Yelshin, A., Mota, M., Teixeira, J. Porous media behaviours modelling and analysis in separation processes, *Proceedings of Int. Conference Filtech Europa-97*, Dьsseldorf, Germany, October 14 – 16 1997, Horsham (UK): Filtration Society, 1997. - pp. 327-334.
9. Zhang, T.C., Bishop, L. Evaluation of tortuosity factors and effective diffusivities in biofilms // *Wat.Res.* - 1994. - Vol. 28, N 11. - P. 2279-2287.
10. *Разделение суспензий в химической промышленности* / Т.А. Малиновская, И.А. Кобринский, О.С. Кирсанов, В.В. Рейнфарт. – М.: Химия, 1983. – 264 с.
11. Коваленко В.П., Ильинский А.А. *Основы техники очистки жидкостей от механических загрязнений*. – М.: Химия, 1982. – 272 с.
12. ТУ 40 БССР 02-53-90. Полотно трикотажное техническое фильтровальное (ПТТФ).- Вводятся впервые: Введ. 01.01.91. Минск: Белстандарт, 1989. – 10 с. Группа М 41.
13. Коган М.А. *Разработка технологии трикотажа для фильтрования суспензий*: Дисс. канд. техн. наук: 05.19.03. – Витебск, 1995. – 184 с.
14. Yelshin, A. Developiry knetted fabric filter media for liquid filtration // *Filtration and Separation* - 1990. - Vol. 27, N 3. - P. 169-170.

15. Жужиков В.А. Фильтрование. Теория и практика разделения суспензий. – М.: Химия, 1971. – 440 с.
16. Бытовые мембранные приборы для получения питьевой воды / Поворов П.А., Дубяга В.П., Корнилова В.С., Кадыкина Г.А. // ВСТ (Водоснабжение и санитарная техника). - 1994. - N 12. - С. 21-23.
17. Marecek, J. Filter plugging and its effect on the filter performance // Ind.And Eng.Chem.Proc.Des.and Develop. - 1981. - Vol. 20, N 4. - P. 693-698.
18. Summerford, K., Quartermaine, B. The importance of pretreatment for RO systems // Water Conditioning and Purification - 1998. - Vol. 40, N 1. - P. 84-87.