

Тагибаев Д.Д.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ОТКРЫТОЯЧЕИСТОГО БЛОЧНОГО ПЕНОПОЛИУРЕТАНА

D.D. Tagibaev

THE STUDY OF FILTRATION PROPERTIES OF OPEN CELLULAR POLYURETHANE FOAM BLOCK

УДК:628.16/067.1

В статье приведены фильтрационные свойства открытоячейстого пенополиуретана (ППУ) по процессе очистки природных вод.

In the article, the filtration properties of open cellular polyurethane foam (SPF) for the cleaning process of natural waters.

Фильтрующая загрузка из зернистых материалов имеет ограниченную пористость, равную 40-42% для кварцевого песка и 50-60% для дробленого керамзита и ряда других зернистых материалов с развитой поверхностью зерен. Соответственно, в фильтрах 40-60% объема загрузки занято самим материалом. Этот объем не участвует в процессе задержания взвести и лишь вызывает увеличение гидравлического сопротивления фильтрующей среды.

В настоящее время химическая промышленность выпускает синтетические полимерные материалы, имеющие пленочную пространственную структуру, пористость которых достигает 90% и более. Среди них наибольший интерес представляет пенополиуретан (ППУ), пористость которого составляет практически максимально возможную величину 96-98% при достаточно большой удельной поверхности ячеек материала. Известны работы по применению ППУ для разделения суспензий, в том числе очистки жидкостей и газов [1], при этом в последнем случае используется ППУ с открытыми порами, что резко снижает его гидравлическое сопротивление.

Отечественная промышленность выпускает ряд марок ППУ [2], отличающихся крупностью пор. Это позволяет создавать фильтры с наиболее рациональным движением жидкости от крупных пор к мелким [3].

Объемная структура ППУ требует несколько иных подходов к описанию показателей его структуры по сравнению с зернистыми материалами. В гидравлике зернистых материалов в качестве характерного линейного параметра используется диаметр зерна. Для ППУ в качестве линейного размера может быть принят размер пор D. Зависимость удельной поверхности от диаметра пор может быть получена через соотношение объема W и поверхности w одной отдельной поры, общее количество которых в любом объеме пленочной структуры однозначно определяется размером поры. Для ячеек кубической формы имеем  $W = D^3$  и  $\omega = 6D^2$ , а для ячеек шарообразной формы  $W = \pi D^3/6$  и  $\omega =$

$\pi D^2$ . В обоих случаях для величины удельной поверхности имеем

$$\omega = 6/D. \tag{1}$$

Однако ячейки ППУ имеют форму, отличную от кубической, так и от шарообразной, кроме того часть поверхности каждой ячейки ППУ открыта, что соответственно уменьшает удельную поверхность фильтрующей среды. С учетом этого можно принять

$$\omega = 6k_1k_2/D = 6k/D, \tag{2}$$

где  $k_1$  – коэффициент формы ячеек (пор);  $k_2$  – коэффициент, учитывающий степень открытия пор;  $k$  – коэффициент удельной поверхности пор ППУ. Для определения величины w были проведены опыты с фильтрованием чистой воды через ППУ различных марок, а также через кварцевый песок. Вычисление удельной поверхности велось по известному соотношению связывающему гидравлический уклон с удельной поверхностью и пористостью фильтрующей среды:

$$\frac{i}{i_0} = \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \left(\frac{m_0}{m}\right)^3, \tag{3}$$

где:  $i$  – гидравлический уклон;  $m$  – пористость фильтрующей среды.

Полученные характеристики геометрической структуры сравнивавшихся фильтрующих материалов представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Фильтрующий материал	Крупность пор (зерен), мм	Пористость %	Удельная поверхность, см <sup>2</sup>
ППУ-40-0,8	0,8	96,7	47,2
ППУ-40-1,2	1,2	96,7	35,5
ППУ-25-1,8	1,8	97,9	25,6
ППУ-25-3,2	3,2	97,9	14,85
Кварцевый песок	1,16	42,0	35,0

Из таблицы видно, что пористость ППУ несравненно выше, чем для кварцевого песка (и других зернистых материалов), а удельная поверхность поровых каналов всех марок открытоячейстого ППУ соизмерима с этой характеристикой фильтрующей среды из кварцевого песка (и несколько меньше, чем у загрузок с развитой поверхностью зерен), увеличиваясь с уменьшением размера пор.

Важным свойством фильтрующей среды из ППУ является возможность регулирования его структурных характеристик путем предварительного сжатия. В этом случае удельная поверхность будет изменяться обратно пропорционально объему материала. При этом пористость будет меняться незначительно. Так, например, при сжатии ППУ-25-3,2 в 3 раза удельная поверхность поровых каналов увеличивается до  $44,55 \text{ см}^{-1}$ , пористость снижается всего до 93,7%. Благодаря высокой пористости гидравлическое сопротивление ППУ значительно меньше, чем у кварцевого песка, что иллюстрируется графиком (рис.1.).

Гидравлические свойства фильтрующей среды обычно характеризуются числом  $Re$  и коэффициентом сопротивления. Для ППУ эти выражения имеют вид:

$$Re = \rho v D / 6 \mu k, \quad (4)$$

$$\varphi = P m 3 D / 6 L \rho v 2 k, \quad (5)$$

где  $\rho$  – плотность воды;  $v$  – скорость фильтрации;  $\mu$  – вязкость воды;  $P/L$  – перепад давления на единицу длины фильтра.

На рис.2. приведена зависимость  $\varphi = f(Re)$  для ряда опытов, показывающая хорошее совпадение вычисленных значений  $Re$  и  $\varphi$  для ППУ различных марок в сравнении с теоретической зависимостью  $\varphi = 5,1 Re$ , выведенной для зернистых фильтрующих сред.

Проведенные исследования показали также, что в рассмотренном диапазоне скоростей гидравлический уклон в фильтрующей среде из ППУ прямо пропорционален скорости фильтрации и обратно пропорционален квадрату отношения  $D/k$ . Следовательно, при расчете гидравлического уклона для различных марок ППУ можно пользоваться формулой

$$\frac{i_0}{i_0^*} = \frac{v k D^*}{v^* k^* D}, \quad (6)$$

где:  $i_0$  – гидравлический уклон в незаилненной загрузке. Звездочкой помечены величины, относящиеся пенополиуретану с известными гидравлическими характеристиками.

Для приближенных расчетов может быть использована формула:

$$\frac{i_0}{i_0^*} = \left( \frac{v k D^*}{v^* k^* D} \right)^{1,7}. \quad (7)$$

Особенности геометрической структуры и гидравлические свойства фильтрующей среды из ППУ определяют ее повышенные фильтрационные показатели при очистке воды. Для количественной оценки этих показателей были проведены сравнительные опыты, позволившие определить параметры кинетики очистки воды фильтрованием для

ППУ разных марок и кварцевого песка при высоте слоя 0,5 м. Опыты проводили в условиях постоянства скорости фильтрации на протяжении фильтроцикла на водопроводной воде искусственно зацвеченной торфяной вытяжкой с добавлением коагулянта – сернокислого алюминия. Результаты одной из групп опытов представлены на рис. 3., из которого видно, что при очистке воды фильтрованием через открытоячеистый ППУ сохраняются основные закономерности кинетики осветления воды и прироста потери напора, имеющие место при фильтровании малоцентрированных суспензий через зернистые загрузки.

Процесс задержания взвести в порах ППУ характеризуется постоянством темпа прироста потери напора во времени и равномерным продвижением фронта отложений в толщу фильтрующей среды. Как и следовало ожидать, начальная потеря напора и темп ее прироста для всех образцов ППУ были значительно меньшими, чем для кварцевого песка и возрастали с уменьшением крупности пор ППУ. Скорость продвижения фронта задержанных загрязнений в толщу загрузки для всех образцов ППУ была также меньше, чем для кварцевого песка и снижалась с уменьшением крупности пор. Это дало основание применять для характеристики процесса очистки воды фильтрованием те же закономерности и показатели, которые используются для оценки процесса очистки воды фильтрованием через зернистые загрузки [4, 5, 6].

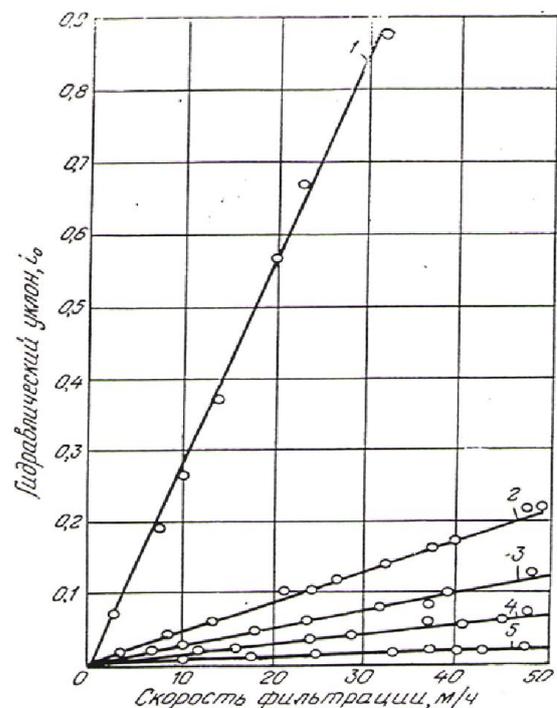


Рис. 1. Зависимость гидравлического уклона от скорости фильтрации для различных материалов: 1 – кварцевый песок  $d=1,16 \text{ мм}$ ; 2 – ППУ-40 – 0,8; 3 – ППУ-40 – 1,2; 4 – ППУ-25 – 1,8; 5 – ППУ-25 – 3,2

Таблица 3.

Сравнительные параметры процесса очистки воды фильтрованием в загрузке из ППУ.

Серия опытов	Фильтрующий материал	$v, \text{ м/ч}$	$i_0$	$h/l, \text{ м/ч}$	$b, \text{ м}^{-1}$	$a/b, \text{ м/ч}$	$F(A)$
1	ППУ-40-0,8	10,0	0,043	0,19	480	0,0432	102
	ППУ-40-1,2	10,15	0,025	0,105	282	0,0525	80
	ППУ-25-1,8	9,9	0,0125	0,041	160	0,0662	49,6
	ППУ-25-3,2	9,95	0,044	0,020	64	0,0932	48,8
	Кварцевый песок						
	$d_{\text{кв}}=1,16 \text{ мм}$	9,85	0,293	0,33	42	0,160	7,043
2	ППУ-40-1,2	7,0	0,018	0,0552	137	0,0179	171,0
		12,5	0,032	0,861	92	0,052	51,7
		22,5	0,057	0,155	61	0,106	27,2

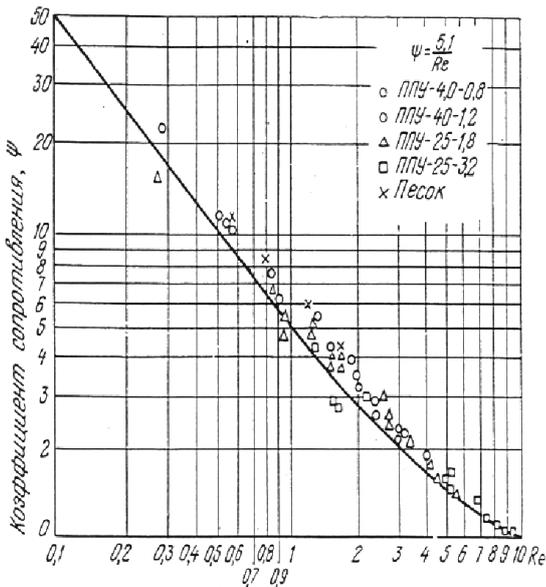


Рис. 2. Обобщенный график зависимости  $\psi = f(Re)$

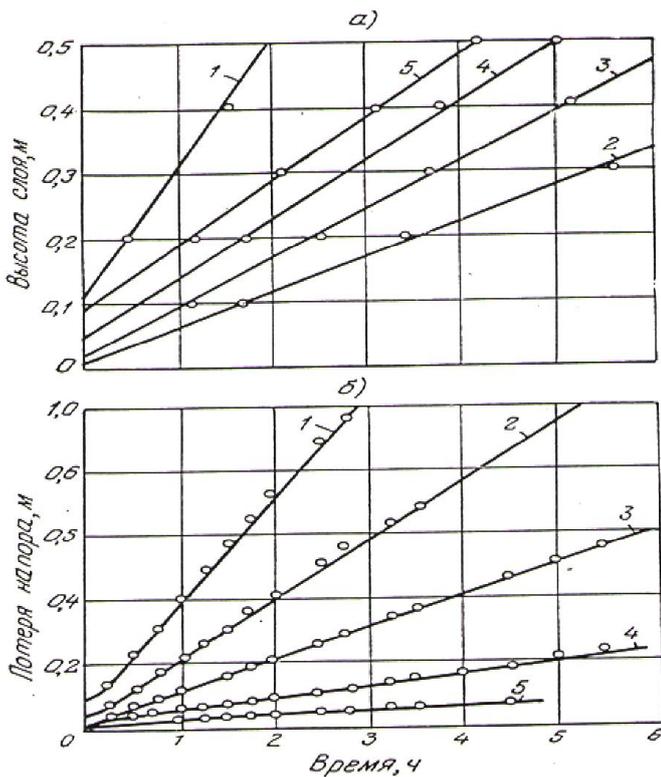


Рис.3. Кинетика очистки воды фильтрованием:  
 а – продвижение фронта отложений в толщу фильтрующей среды; б – прирост потери напора в фильтрующей среде 1– кварцевый песок  $d = 1,16 \text{ мм}$ ; 2 – ППУ-40 – 0,8; 3 – ППУ-40 – 1,2; 4 – ППУ-25 – 1,8; 5 – ППУ-25 – 3,2.

В табл. 2. представлены полученные в некоторых опытах параметры процесса фильтрования, при этом в первой группе опытов переменной величиной являлась крупность пор ППУ, а во второй – скорость фильтрации.

Из приведенных в табл. 2. результатов первой группы опытов видно, что открытоячеистый пенополиуретан имеет значительно лучшие фильтрационные показатели, чем кварцевый песок. Так, параметр “b”, характеризующий интенсивность прилипания частиц взвести к поверхности фильтрующей среды для пенополиуретана с мелкими порами значительно выше, а параметр “a/b”, характеризующий скорость проникновения загрязнений в толщу фильтрующей среды, значительно ниже, чем для кварцевого песка. Значительно большие значения имеет также комплексный показатель  $F(A)$ , являющийся функцией предельной насыщенности порового пространства отложениями. Полученные данные указывают на возможность осуществления процесса очистки воды на ППУ с большими скоростями фильтрования, что подтверждается результатами второй группы опытов.

На основе проведенных исследований получены зависимости для пересчета значений параметров кинетики процесса фильтрования при изменении скорости фильтрации и крупности пор ППУ:

$$b = b^* \left( \frac{v^*}{v} \right)^{0,7} \left( \frac{D^*}{D} \right)^{1,4} \quad (8)$$

$$\frac{a}{b} = \frac{a^*}{b^*} \left( \frac{v}{v^*} \right)^{1,7} \left( \frac{D}{D^*} \right)^{0,6} \quad (9)$$

Для определения величины предельной насыщенности и возможности проведения расчетов по выбору оптимальной загрузки из ППУ предложенный Д.М. Минцем, график  $F(A) = f(A)$  был экстраполирован до значения  $F(A) = 240$  (рис.4.).

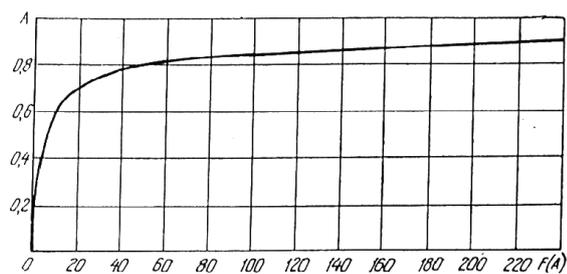


Рис. 4. График функции  $F(A)$

Проведенные экспериментальные исследования показали, что фильтрационными свойствами по сравнению с известными зернистыми материалами, что позволяет создавать высокопроизводительные фильтровальные устройства новых конструкций, работающие с большими скоростями фильтрации (30-50 м/ч и более).

#### Литература:

1. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха. М., Стройиздат, 1974.
2. ОСТ 6-05-407-75. Пенополиуретан эластичный на основе полиэфира П-2200.
3. Мельцер В.З. Финкельштейн В.В., Непаридзе Г.Г. "Моделирование и расчет фильтров с зернистой загрузкой. Материалы семинара "Процессы и сооружения для разделения взвесей при очистке природных и сточных вод. МДНТП. М., 1980.
4. Минц Д.М. Теоретические основы технологии очистки воды. М., Стройиздат, 1964.
5. Минц Д.М., Криштул В.П. Моделирование процесса фильтрации суспензий через зернистые слои. Сб. науч. работ АКХ, № 1, – М.: Изд. МКХ РСФСР, 1960.
6. Минц Д.М., Мельцер В.З. Упрощенный метод технологического моделирования процесса фильтрации. Научные труды АКХ. Вып.98. "Водоснабжение", № 9, ОНТИ АКХ, М., 1973г.

Рецензент: к.т.н., доцент Абдурасулов А.И.