

УДК 66.067.12

Вегера А.И., Ельшин А.И., Волков В.К., Жаркова О.Н.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ ФИЛЬТРОМАТЕРИАЛОВ

Резюме

Статья представляет обзор пористых материалов, используемых в технике фильтрации жидких дисперсных сред. Рассмотрены технические и экономические показатели фильтровальных материалов, представленных на рынке Республики Беларусь и мировом рынке.

Процесс фильтрации обладает низкой энергоемкостью при высокой селективности разделения, что определяет большой спрос на фильтровальное оборудование и материалы на мировом рынке. В 1995 году в мире было потрачено US\$ 335 миллиардов на фильтроматериалы и оборудование [1]. Из них 165 миллиардов долларов - на фильтры для очистки питьевой воды и муниципальных сточных вод и 170 миллиардов - на фильтры, используемые в промышленности (100 млрд. - процессы фильтрации, 40 млрд. - промышленная водная очистка и 25 млрд. – обработка сточных вод). По данным того же источника [1], ежегодные инвестиции на фильтровальную технику и технологию повысятся к 2000 году до US\$ 500 миллиардов в год.

Выбор предлагаемых фильтроматериалов чрезвычайно широк: от тканей и фильтровальной бумаги до экзотических материалов, подобно измельченной скорлупе грецкого ореха и испанскому мху [2].

Фильтроматериалы используются во всех основных отраслях промышленности. Для большинства процессов разработаны специализированные фильтроматериалы. Однако, иногда требуется их комбинация при особенно трудном разделении дисперсных систем.

Можно выделить следующие тенденции в развитии фильтровальных материалов.

1. Все более широкое применение фильтроматериалов в технике охраны окружающей среды. При этом предпочтение отдается разработке и внедрению легко регенерируемых и экологических фильтров.

2. Создание специализированных фильтров. Потребители требуют для удовлетворения своих специфических потребностей более высокое качество очистки и фильтроматериалы с контролируемым размером пор. Чтобы удовлетворить эти требования, производители предлагают многослойные композиционные материалы.
3. Увеличение тонкости фильтрования. Потребители часто нуждаются в более тонкой фильтрации на всех уровнях. В центре этой тенденции — увеличение надежности фильтров, которую ограничивает одновременный рост их стоимости.

Рассмотрим некоторые пористые среды, часто применяющиеся в фильтровальной технике. Обобщенные характеристики разделительных пористых материалов можно найти в работах [2, 3]:

- **Керамика.** К достоинствам керамики отнесится химическая стойкость, стойкость к высокой температуре, к недостаткам – высокую стоимость и хрупкость. Используются керамические пористые материалы в биотехнологии, фармацевтике, процессах регенерации. Отмечается нарастающая тенденция продвижения данного типа пористых материалов на рынке фильтроматериалов.

- **Вспомогательные фильтрующие вещества (ВФВ).** Характеризуются дешевизной, являются прекрасным основанием для фильтрования с образованием осадка. К недостаткам можно отнести одноразовость использования и ограниченность применения по перепаду давления. Используются для образования намывного слоя. Объем продаж на мировом рынке постоянен.

- **Стекло.** Обладает стойкостью к высокой температуре, химической стойкостью, дешевизной, низкой пластичностью (растягиваемостью). Имеется ограничение по применению в различных процессах, отмечается низкая прочность. Широко применяется для лабораторных фильтров. Увеличение уровня продвижения на рынке не наблюдается.

- **Пористые металлы.** Достоинства: многократное использование, стойкость к высоким температурам, узкое распределение размера пор, разнообразие свойств. Недостатки: высокая стоимость. Область применения: аэрокосмическая промышленность, фильтрование полимеров, процессы регенерации. Отмечается не снижающаяся тенденция уровня продвижения на рынке пористых материалов.

- **Нетканые материалы.** Достоинства: низкая стоимость, высокая грязеемкость, разнообразие конструкций. Недостатки: случайные поры, проскок частиц, вымывание

волокон. Применяются в химии, медицине, водоподготовке. Отмечается расширение применения названного типа материалов.

- **Фильтровальная бумага.** Достоинства: дешевизна, большой выбор. Недостатки: возможность вымывания волокон, слабая прочность во влажном состоянии, проскок частиц, одноразовое использование. Область применения: автомобили, воздух в лабораториях, некоторые процессы промышленности. На рынке пористых сред наблюдается снижение уровня продаж.

- **Пористые пластики.** Характеризуются высокой грязеемкостью, большим разнообразием полимеров. Следовательно, возможно их применение для разделения систем с различными физико-химическими свойствами. Применяются в медицине, очистке масел, фильтровании воды. Уровень продвижения на рынке не изменяется.

- **Тонкие тканые синтетические сетки.** Достоинства: высокая химическая стойкость, минимальное сопротивление, точный размер пор, широкий выбор по тонкости отсева. Недостатки: увеличение стоимости с уменьшением размера пор. Область применения: обезвоживание, медицина, автомобильная промышленность, промышленное фильтрование. Отмечается рост уровня продвижения на рынке пористых материалов.

- **Ткани.** Характеризуются высокой прочностью, низкой стоимостью, высокой грязеемкостью, большим выбором. Недостатки: низкая скорость фильтрования, случайное распределение пор, возможность проскока частиц. Применяются в широком спектре фильтровального оборудования, в качестве префильтров в мембранных установках. Тенденции уровня продвижения на рынке не изменяются.

- **Мембраны.** Достоинства: узкое распределение пор по размерам, различные полимеры. Недостатки: высокая стоимость, низкая скорость фильтрования. Области применения: фармацевтика, полупроводники, медицинские устройства, производство ультрачистой воды. Отмечается рост уровня продвижения на рынке пористых сред.

Фильтроматериалы характеризуются следующими показателями.

1) Проницаемостью k :

$$u = k \cdot \frac{\Delta p}{\mu L}, \quad (1)$$

где u -- скорость фильтрации жидкости, Δp -- перепад давления при течении жидкости через фильтроматериал, μ -- динамическая вязкость, L -- толщина фильтроматериала.

Проницаемость зависит от размера пор, пористости, извилистости и формы пор.

2) Эффективностью или задерживающая способность по отношению к твердым частицам, обычно определяется экспериментально. Эффективность E лежит в пределах $(0 \dots 1)$ и может быть выражена равенством:

$$E = \frac{g' - g''}{g'}, \quad (2)$$

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

3) Регенерируемостью, определяемой как возможностью регенерации (физическим, химической и др. воздействием) с целью восстановления проницаемости фильтроматериала. Обычно определяется в долях от первоначальной проницаемости.

4) Распределением пор по размерам и средним размером пор; часто определяется пузырьковым методом [4, 5, 6].

5) Важным показателем, учет которого необходим при выборе фильтровального материала, являются энергозатраты на проведение процесса фильтрования. Величина энергозатрат связана с такой характеристикой пористого материала среды как проницаемость.

Энергозатраты обратно пропорционально зависят от проницаемости $\mathcal{E} = f\left(\frac{1}{k}\right)$, где проницаемость k пористого слоя определяется уравнением [7]:

$$k = k'd_s^2 \varepsilon / 8T^2, \quad (3)$$

где k' - числовой коэффициент; d_s - эквивалентный диаметр порового канала, ε - пористость слоя, T - средняя извилистость пор.

6) Сроком службы, стоимостью, эксплуатационными затратами и другими показателями.

Очевидно, что при выборе фильтроматериала, потребителю необходим учет как технологических, так и затратных показателей, которые находятся в тесной взаимосвязи.

Ниже рассматривается один из консолидированных критериев для предварительной оценки фильтровальных материалов. С этой целью проведен анализ характеристик фильтроматериалов, представленных на рынке Республики Беларусь, а также на мировом рынке [2], объединяя их по типу материала в группы, кратко охарактеризованные выше.

Фильтровальные материалы оценивались по относительным критериям: относительная стоимость C , относительная эффективность фильтрования E и относительная проницаемость \bar{k} .

При оценке относительной стоимости, общей эффективности и относительной проницаемости была использована, приведенная в [2], балльная система, где за 1 балл относительной стоимости принята стоимость бумаги, а за 10 баллов - стоимость керамических пористых сред. Общая эффективность оценивалась в 10 баллов в случае мембран и в 1 балл - у обычной фильтровальной бумаги. За 1 балл относительной проницаемости принималась средняя удельная производительность ультрафильтрационных мембран, а за 10 баллов – проницаемость вспомогательных фильтрующих веществ. Дополнительно исследованы фильтроматериалы, представленные на рынке Республики Беларусь, их стоимостные и технологические параметры и сопоставлены на основании вышеописанной балльной системы. Результаты проведенной оценки различных типов фильтровальных сред, представленных на рынке РБ, приведены в таблице.

Таблица

Характеристика фильтроматериалов, представленных на рынке Республики Беларусь

Тип пористой среды	Относительная стоимость, C	Относительная общая эффективность фильтрации, E	Относительная проницаемость, \bar{k}
Бумага	1	3	5
Картон	1,3	3	4,5
Ткани	2	4	4
Пористые пластмассы	2	5	8
Сетки	2	5	8
Трикотажные материалы	3	6	7
Керамика	7	7	2,5
Мембраны	7	9	1,5

На рисунке представлена зависимость комплекса $E \cdot \bar{k} / C$ от C / \bar{k} для объединенных данных [2] и таблицы. Как видно из рисунка, существует общая закономерность для всех приведенных данных.

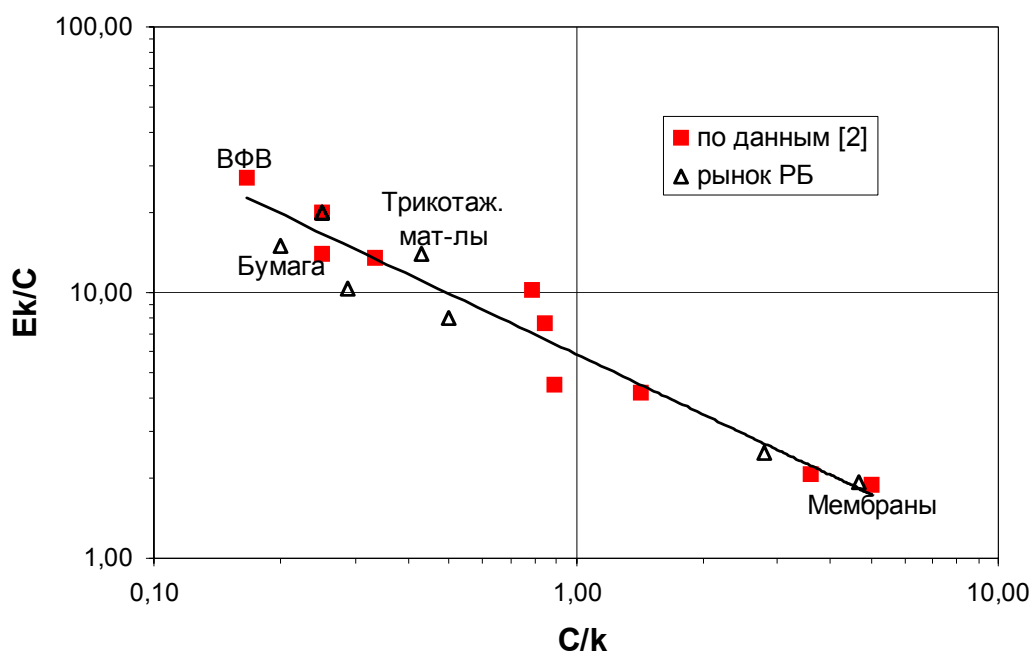


Рисунок. Зависимость комплекса $E \cdot \bar{k} / C$ от отношения стоимости к проницаемости фильтроматериала C / \bar{k} .

Между приведенными выше комплексами установлена следующая корреляционная связь:

$$\frac{E \cdot \bar{k}}{C} = 5,87 \cdot \left(\frac{C}{\bar{k}} \right)^{-0,76} \quad (4)$$

Комплекс C / \bar{k} характеризует стоимость единицы проницаемости фильтроматериала, а комплекс $E \cdot \bar{k} / C = E \cdot (C / \bar{k})^{-1}$ - соотношение эффективности и стоимости единицы проницаемости фильтроматериала. Из приведенного графика следует, что максимальная эффективность на единицу затрат проявляется у фильтровальных вспомогательных веществ и фильтровальной бумаги. Близко к названным фильтроматериалам находятся трикотажные материалы, что делает их весьма привлекательными для использования, так как помимо высокой эффективности и низкой стоимости они обладают еще рядом технологических достоинств. Это высокая прочность, хорошая регенерируемость, химическая стойкость, низкое гидравлическое сопротивление [8]. Трикотажные фильтроматериалы представляют собой трикотаж повышенной толщины, поверхностного и объемного заполнения [8-10], поэтому они обладают преимуществами объемных и поверхностных фильтров. По сравнению с фильтровальным картоном и тканями, трикотажные фильтры имеют более

низкую стоимость единицы проницаемости при практически такой же эффективности единицы затрат. Это говорит о высоком потенциале и перспективности применения трикотажных фильтроматериалов.

С другой стороны, полупроницаемые мембраны обладают высокой эффективностью, стоимостью, но низкой проницаемостью. Вследствие этого соотношение эффективности и стоимости единицы проницаемости мембран мала. Отсюда следуют и основные пути совершенствования систем очистки с применением мембран: повышение их проницаемости, а также снижение стоимости и энергозатрат на проведение процесса. Именно в этом направлении сосредоточены усилия многих ведущих фирм - производителей мембран. Речь идет о создании нанофильтрационных и низконапорных обратноосмотических мембран.

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

В заключении отметим, что рассмотренный подход к предварительной оценке фильтроматериалов нуждается в дополнительном технико-экономическом анализе при переходе к системе разделения в целом, где применяется фильтроматериал, так как эксплуатационные затраты на функционирование системы могут сместить экономические оценки. Таким образом, вместе с предложенным критерием целесообразно проводить последующую процедуру оптимизации по условиям наибольшей производительности или наибольшей экономичности процесса.

Литература

1. McIlvaine, R., 1996, World water treatment market to reach \$500 billion by 2000 // *Filtration and Separation*. - Vol. 33, No. 5. - p. 362.
2. Gregor, E.C. *Filtration and Separation considerations in the selection of media for process application* // *Advances in Filtration and Separation Technology*, Vol.6. Ed. R.W.Peters, Cahners Publ. Co., Des Plaines, IL, USA, 1992, pp. 29-33

3. Жужиков В.А. Фильтрация. Теория и практика разделения суспензий. - М.: Химия, 1971. - 440 с.
4. Flood J.E., Porter H.F., Rennie F.W. Filtration practice today // Chem. Eng. – 1966. – 73, № 13. – p. 163.
5. Gross R.J. More about bubble point filter tests // Hudraul. and Pneumat. – 1963. – 16, №8 – p. 74.
6. Виленский В.М. Изучение свойств стеклянного полидисперсного фильтра методом пропрессовывания газа // Ж. прикл. хим. –1965. -- 38, № 6. – С. 1285.
7. Водоподготовка: процессы и аппараты / Под ред. О.И. Мартыновой. - М.: Энергоиздат, 1990. - 272 с.
8. Ельшин А.И., Путинцев С.А., Петрова В.А. и др. Применение трикотажных материалов в качестве фильтровальных элементов для разделения суспензий // Химическая промышленность. – 1989. - №2. С. 137-138.
9. А.с. 1503863 (СССР). МКИ В 01 D 3/32. Фильтрующий материал для суспензий / В.А. Петроав, М.А.Коган, А.И.Ельшин и др.- Заявл. 10.11.87. Бюл. N 32, 1989.
10. 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.