

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ ОТ ВЗВЕСЕЙ

В.В.Евстигнеев, С.В.Кожурин, В.Н.Красов, Н.П.Тубалов, В.И.Пролубников

Использование новых материалов в промышленности определяется их эффективностью работы и стоимостью. Нами разработаны металлокерамические фильтры на основе отходов машиностроения для очистки жидкостей, обладающие высокой степенью очистки при достаточной пропускной способности [1, 2]. Для оценки внедрения новых материалов для серийного производства проведены исследования и расчеты эффективности их использования в промышленных условиях. Эффективность использования фильтров определяется соотношением степени очистки жидкостей от примесей и пропускной способностью фильтра.

Степень очистки жидких сред от твердых частиц определяли пропусканием фильтрата через фильтр тонкой очистки из бумаги, который предварительно взвешивали, высушивали и измеряли массу. По разности определяли концентрацию примесей.

Тонкость и полноту фильтрования определяли для образцов с различной пористостью, изготовленных из порошков с разным диаметром частиц. Результаты измерения представлены в таблице 1.

Таблица 1

Зависимость тонкости и полноты фильтрования жидкости от свойств исходных порошков

Средний размер частиц, мкм	Пористость материала, %	Диаметр пор, мкм	Тонкость фильтрации, мкм
0,050–0,100	29,0	24	7–9
0,100–0,160	31,0	32	15–18
0,160–0,200	34,5	54	20–25
0,200–0,250	36,6	75	35–45
0,250–0,315	38,4	128	50–65
0,315–0,500	40,1	160	75–85
0,500–0,800	44,0	220	100–110

Проанализировав данные таблицы 1 можно сделать вывод, что пористые проницаемые материалы обладают высокой степенью очистки жидкостей от мелкодисперсных примесей и могут быть использованы для фильтрования различных технических средств, в частности, для очистки топлива и масел в двигателях внутреннего сгорания.

Значение гидравлического сопротивления образцов в рабочем режиме допускается не выше 0,16 МПа.

По экспериментальным данным были построены графики зависимости сопротивления фильтрующих образцов от скорости фильтрования. Результаты эксперимента представлены на рисунке 1.

Результаты испытания фильтрующих образцов при различной пористости материала представлены на графиках (рис. 1-5).

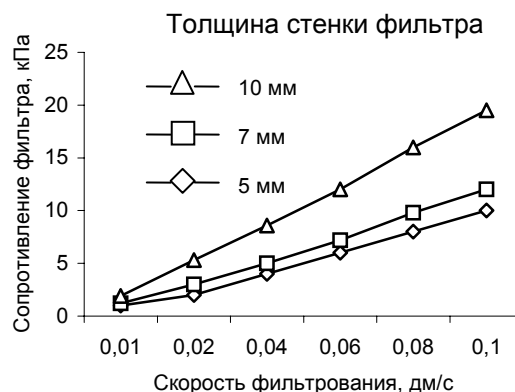


Рисунок 1-Зависимость сопротивления чистого фильтра от скорости фильтрования

Целесообразно, чтобы исследуемый образец отвечал следующим требованиям

- задерживал твердые частицы с размером от 10 мкм и выше с эффективностью 98-99%;

- обладал гидравлическим сопротивлением до 0,6 МПа при скорости фильтрования не ниже $4 \cdot 10^{-3}$ м/с.

Известно, что материалы из металлокерамики имеют высокую эффективность очистки, чем меньше размер пор, тем меньше по размерам частицы способна задержать перегородка, но, с уменьшением размера пор, увеличивается сопротивление перегородки, а значит, растет энергоёмкость фильтра.

Исследовано пятнадцать образцов фильтрующего материала, различных по толщине, размером пор, пористости. В результате были отобраны образцы, которые

удовлетворяют требованиям.

После предварительного исследования сопротивления фильтрующих образцов был поставлен и спланирован полный факторный эксперимент (ПФЭ).

Условия и план проведения ПФЭ представлены в таблице 2.

Таблица 2

Уровни факторов при планировании ПФЭ

Фактор	Единица измерения	Кодовое обозначение	Уровни			Шаг варьирования
			верхний	основной	нижний	
Скорость фильтрации	м/с	X ₁	4,2·10 ⁻³	2,3·10 ⁻³	4·10 ⁻⁴	1,9·10 ⁻³
Степень загрязненности фильтра	%	X ₂	20	50	80	30

Таблица 3

План проведения ПФЭ по исследованию сопротивления фильтрующего элемента

№ опыта	Факторы		Результаты эксперимента		
	X ₁	X ₂	Y ₁	Y ₂	Y _u
1	-	-	995	990	992
2	-	-	5278	5264	5271
3	+	+	6146	6132	6139
4	+	+	48556	48563	48559
0	0	0	21573	21570	21571

По результатам двухфакторного эксперимента можно составить уравнение регрессии, в котором помимо линейных членов будет член, учитывающий эффект парного межфакторного взаимодействия:

$$A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + A_{12}X_1X_2, \quad (1)$$

$$\text{где } A_0 = \sum_{u=1}^N Y_u / N = 15240,4, \quad (2)$$

$$A_1 = \sum_{u=1}^N \frac{X_{1u} \bar{Y}_u}{N} = 11674,9, \quad (3)$$

$$A_2 = \sum_{u=1}^N \frac{X_{2u} \bar{Y}_u}{N} = 12108,9, \quad (4)$$

$$A_{12} = \sum_{u=1}^N \frac{X_{1u} X_{2u} \bar{Y}_u}{N} = 9535,4. \quad (5)$$

Уравнение процесса будет иметь вид:

$$Y = 15240,4 + 11674,9X_1 + 12108,9X_2 + 9535,4X_1X_2. \quad (6)$$

Далее проводим статистический анализ значимости коэффициентов уравнения и его адекватности.

Построчная оценка дисперсии воспроизводимости единичного результата измерения в каждом опыте:

$$S^2(Y_u)_k = \frac{\sum_{k=1}^{m_u} |(Y)_k - \bar{Y}_u|^2}{m_u - 1}, \quad (7)$$

$$S^2(Y_u)_1 = 13; \quad S^2(Y_u)_2 = 98;$$

$$S^2(Y_u)_3 = 98; \quad S^2(Y_u)_4 = 14,2.$$

Средняя для всего эксперимента оценка дисперсии воспроизводимости единичного результата:

$$\bar{S}^2(Y_u) = \frac{\sum_{k=1}^{m_u} S^2(Y_u)_k}{m_u - 1} = 55,8. \quad (8)$$

Средняя для всего эксперимента дисперсия воспроизводимости среднего значения выхода в каждой строке:

$$S^2(\bar{Y}_u) = \frac{\bar{S}^2(Y_u)}{m_u} = 27,9, \quad (9)$$

$$S^2(A_i) = \frac{S^2(\bar{Y}_u)}{N} = 7, \quad (10)$$

$$S(A_i) = 2,6.$$

Доверительная ошибка результатов рассчитывается по критерию Стьюдента:

$$\varepsilon(A_i) = t(p, f) \cdot S(A_i) = 6,2. \quad (11)$$

Проверим коэффициенты на значимость:

$$15240,4 > 6,7 - \text{значим};$$

$$11674,9 > 6,7 - \text{значим};$$

$$12108,9 > 6,7 - \text{значим};$$

$$9535,4 > 6,7 - \text{значим}.$$

Так как $|A_i| > \varepsilon \cdot |A_i|$, значит, оценка коэффициентов A_i значимо отличается от нуля и отпадает необходимость статистической проверки адекватности уравнения экспериментальным данным.

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ
ОЧИСТКИ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ ОТ ВЗВЕСЕЙ**

Вычисляем расчетные значения выходного параметра для каждого опыта \hat{Y}_u :

$$\hat{Y}_1 = 15240,4 - 11674,9 - 12108,9 + 9535,4 = 992;$$

$$\bar{Y}_1 = 992,$$

$$\hat{Y}_2 = 15240,4 + 11674,9 - 12108,9 - 9535,4 = 5271;$$

$$\bar{Y}_2 = 5271,$$

$$\hat{Y}_3 = 15240,4 - 11674,9 + 12108,9 - 9535,4 = 6139;$$

$$\bar{Y}_3 = 6139,$$

$$\hat{Y}_4 = 15240,4 + 11674,9 + 12108,9 + 9535,4 = 48559,6$$

$$\bar{Y}_4 = 48559,5.$$

Полученные результаты ($\hat{Y}_1 = \bar{Y}_1$; $\hat{Y}_2 = \bar{Y}_2$ и так далее) показывают, что коэффициенты уравнения рассчитаны без арифметических ошибок.

Дополнительно к плану был поставлен в двух повторениях опыт в центре эксперимента.

Средняя арифметическая оценка результата опыта в центре эксперимента рассчитывают по формуле:

$$Y_0 = \frac{1}{m_0} \cdot \sum_{k=1}^{m_0} Y_{0k} = 21571,5, \quad (12)$$

где m_0 – число повторностей опыта.

Оценка дисперсии:

$$S^2(Y_{0k}) = \frac{\sum_{k=1}^{m_0} (Y_{0k} - \bar{Y}_0)^2}{m_0 - 1} = 4,5, \quad (13)$$

$$S^2(\bar{Y}_0 - A_0) = \frac{N_m + m_0}{N_m \cdot m_0} \times \frac{S^2(Y_{0k})(m-1) + S^2(Y_k)N(m-1)}{(m_0 - 1) + N(m-1)} = 28,5 \quad (14)$$

$$S(\bar{Y}_0 - A_0) = 5,3;$$

$$\varepsilon(\bar{Y}_0 - A_0) = 13,6;$$

$$|\bar{Y}_0 - A_0| = 6331,1;$$

$$|\bar{Y}_0 - A_0| > \varepsilon |\bar{Y}_0 - A_0|, \text{ то есть разность значима, равносильно доказательству необходимости включения в уравнение оценок квадратичных эффектов факторов.}$$

Для их вычисления был составлен план проведения полного факторного эксперимента второго порядка, который представлен в таблице 4.

Для их вычисления был составлен план проведения полного факторного эксперимента второго порядка, который представлен в таблице 4.

Таблица 4

План проведения ПФЭ второго порядка по исследованию сопротивления фильтра

№	X ₁	X ₂	Y ₁	Y ₂	Y _u
1	+	+	48556	48563	48559,5
2	-	-	995	990	992
3	+	-	5278	5264	5271
4	-	+	6146	6132	6139
5	-R	0	4447	4450	4448,5
6	+R	0	36785	36793	36789
7	0	-R	5348	5341	5344,5
8	0	+R	29438	29432	29430
9	0	0	20750	20746	20748

$$Y_0 = B_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2 + B_{12} X_1 X_2 + B_{11} X_1^2 + B_{22} X_2^2 \quad (15)$$

$$B_0 = A_0 \sum_{u=1}^N Y_u = 17524,6;$$

$$B_1 = A_1 \sum_{u=1}^N (X_{1u} \cdot Y_u) = 13173,8;$$

$$B_2 = A_1 \sum_{u=1}^N (X_{2u} \cdot Y_u) = 12086,8;$$

$$B_{12} = A_2 \sum_{u=1}^N (X_{1u} \cdot X_{2u} \cdot Y_u) = 9535,4;$$

$$B_{11} = A_3 \sum_{u=1}^N (X_{1u}^2 \cdot Y_u) = -3001,2;$$

$$B_{22} = -4855,8.$$

Уравнение имеет вид:

$$Y = 17524,6 + 13173,8 X_1 + 12086,8 X_2 + 9535,4 X_1 X_2 - 3001,2 X_1^2 - 4855,8 X_2^2; \quad (16)$$

$$S^2(B_0) = B_0 S(Y) = 6,2;$$

$$S^2(B_1) = S^2(B_2) = A_1 S(\bar{Y}) = 9,3;$$

$$S^2(B_{12}) = A_2 S^2(\bar{Y}) = 14,0;$$

$$S^2(B_{11}) = S^2(B_{22}) = A_3 S^2(\bar{Y}) = 28,9;$$

$$S^2(B) = \frac{\sum_{u=1}^N S^2(B_u)}{N} = 10,5; \quad (17)$$

$$S^2(\bar{B}) = S^2(B)/2 = 5,3;$$

$$S^2(A_i) = S^2(\bar{B})/N = 0,58;$$

$$S(A_i) = 0,76;$$

$$\varepsilon = 2,57 \cdot S(A_i) = 1,95.$$

Проверим коэффициенты на значимость:

$$17524,6 > 1,95 - \text{значим};$$

$$9535,4 > 1,95 - \text{значим};$$

$$13173,8 > 1,95 - \text{значим};$$

3001,2 > 1,95 – значим;
 12086,8 > 1,95 – значим;
 4855,5 > 1,95 – значим.

Так как все коэффициенты уравнения оказались значимы, то проверка адекватности уравнения теряет смысл.

Анализ уравнения (4.16) показывает, что прирост сопротивления фильтрующего элемента дает свободный член уравнения (17524,6), затем коэффициент (13173,8). Перебор вариантов показал, что минимальное сопротивление фильтрующего материала имеем при $X_1=-1$ и $X_2=-1$ или в натуральном выражении скорость фильтрации $4 \cdot 10^{-4}$ м/с.

Аналогичным образом проведено планирование других экспериментов.

На рисунках 2 – 5 представлены результаты экспериментов.

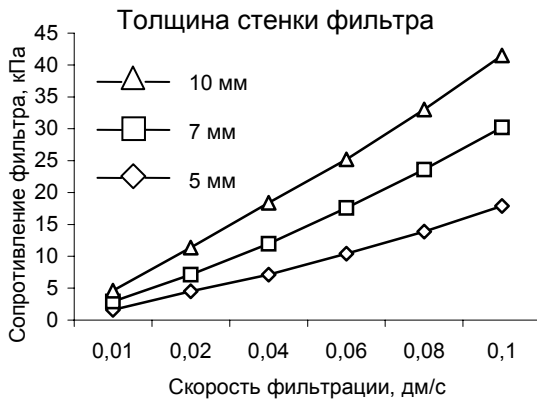


Рисунок 2-Зависимость гидравлического сопротивления фильтра от скорости фильтрации при степени загрязненности фильтра на 30%

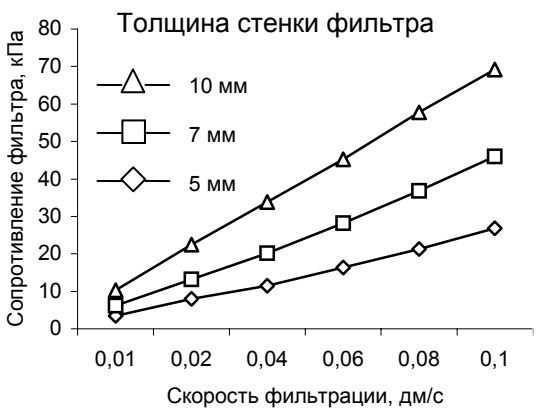


Рисунок 3-Зависимость сопротивления фильтра от скорости фильтрации

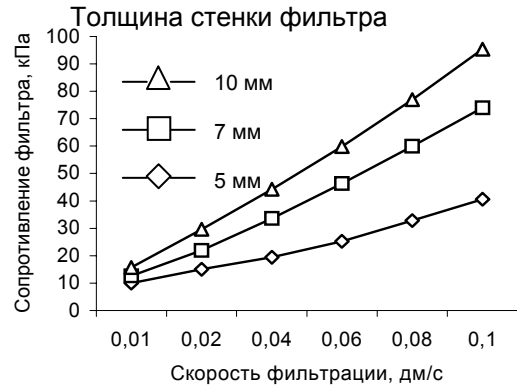


Рисунок 4-Зависимость сопротивления фильтра от скорости фильтрации при степени загрязненности фильтра на 50%

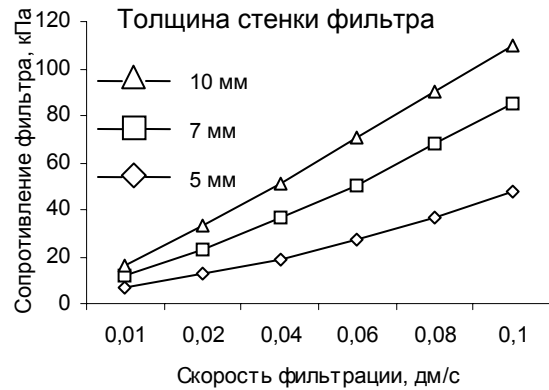


Рисунок 5-Зависимость скорости фильтрации от сопротивления фильтра при степени загрязненности фильтра на 80%

Выводы по результатам экспериментов:
 -сопротивление пористого фильтрующего элемента зависит от размера пор, пористости, зернистости исходного порошка, толщины стенок и скорости фильтрации;
 -чем меньше пористость фильтрующего элемента, тем выше тонкость фильтрации и выше его сопротивление и наоборот;
 -с увеличением размера частиц порошка, а значит и диаметра пор, снижается сопротивление фильтрующего материала, но уменьшаются фильтровальные свойства;
 -данный фильтрующий материал обладает высокой эффективностью для очистки технических жидкостей при достаточной пропускной способности.

ЛИТЕРАТУРА

1.Евстигнеев В.В., Рахманов В.Н., Гончаров В.Д., Пролюбников В.И. Освоение серийного производства пористых изделий на основе технологии активированного спекания/ Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: Материалы и технологии. – Новосибирск: Наука, 2001. – С. 37-39.

2.Интегральные технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза: Монография / Евстигнеев В.В., Вольпе Б.М., Милукова И.В. и др. – М.: Высшая школа, 1996. – 274 с.