

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**  
**TECHNICAL SCIENCES**

УДК 519.23; 62-73

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-234-241>

Поступило в редакцию 05.11.2024

Received 05.11.2024

**Р. А. Кусин<sup>1</sup>, М. М. Дечко<sup>2</sup>, И. Н. Черняк<sup>1</sup>, А. Р. Кусин<sup>2</sup>, Н. В. Рутковская<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа,  
Минск, Республика Беларусь*

<sup>2</sup>*ОАО «ЛМЗ Универсал», Солигорск, Республика Беларусь*

<sup>3</sup>*Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

**ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ФИЛЬТРОВ С ОРТОТРОПНОЙ СТРУКТУРОЙ  
НА ОСНОВЕ ТКАНЫХ СЕТОК ПРИ ОГРАНИЧЕННЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ  
ВАРЬИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩИМИ ФАКТОРАМИ**

*(Представлено академиком А. Ф. Ильющенко)*

**Аннотация.** В технике для очистки газов и жидкостей от твердых включений широко применяются сетчатые фильтрующие материалы, имеющие ряд достоинств: высокие прочность, проницаемость и термостойкость, способность к многократной регенерации. Однако их существенным недостатком является невысокая грязеемкость и, соответственно, ресурс работы до регенерации. При этом процесс регенерации затруднен, полностью удалить все застрявшие в ячейках частицы загрязнений не удается, сами ячейки подвержены деформации. Указанных недостатков лишен фильтрующий материал на основе тканых сеток (ФМТС) с ортотропной структурой. ФМТС имеет повышенную грязеемкость, так как работает в режиме глубинного фильтрования. Кроме того, щелевые каналы, в которых задерживаются частицы загрязнителя, могут быть полностью очищены в процессе регенерации с разборкой фильтра, т. е. ФМТС имеет практически неограниченный ресурс работы. Утилизация ФМТС может осуществляться наиболее предпочтительным методом – путем повторного использования материальных ресурсов, что исключает экологические проблемы при переработке. Рациональное проектирование изделий из ФМТС основано на установлении взаимосвязи между параметрами структуры и свойствами материала. В представленной работе решена задача прогнозирования и оптимизации эксплуатационных свойств ФМТС на основе математических моделей взаимосвязи структурных параметров с технологическими характеристиками и свойствами при ограниченных возможностях варьирования управляющими факторами.

**Ключевые слова:** фильтрующий материал, тканые сетки, ортотропная структура, математико-стохастическая модель, планирование экспериментов

**Для цитирования.** Оптимизация конструкции фильтров с ортотропной структурой на основе тканых сеток при ограниченных возможностях варьирования управляющими факторами / Р. А. Кусин, М. М. Дечко, И. Н. Черняк [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2025. – Т. 69, № 3. – С. 234–241. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-234-241>

**Ruslan A. Kusin<sup>1</sup>, Mikhail M. Dechko<sup>2</sup>, Iryna M. Charniak<sup>1</sup>, Aleksey R. Kusin<sup>2</sup>, Nataliya V. Rutkovskaya<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*O. V. Roman Powder Metallurgy Institute, Minsk, Republic of Belarus*

<sup>2</sup>*JSC “LMZ Universal”, Soligorsk, Republic of Belarus*

<sup>3</sup>*Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus*

**OPTIMIZATION OF THE DESIGN OF FILTERS WITH ORTHOTROPIC STRUCTURE ON THE BASIS  
OF WOVEN MESHES AT LIMITED POSSIBILITIES OF CONTROL FACTORS VARIATION**

*(Communicated by Academician Aliaksandr Ph. Ilyushchanka)*

**Abstract.** Mesh filter materials are widely used in the filtration of gases and liquids solid inclusions, exhibiting numerous advantages, including high strength, permeability, and heat resistance, as well as the capacity for multiple regeneration. However, a notable disadvantage is their limited dirt capacity, which consequently results in a reduced service life prior to re-

generation. Simultaneously, the regeneration process is challenging. It is not feasible to entirely eliminate all the dirt particles that have become embedded within the cells. Additionally, the cells themselves are susceptible to deformation. The filtering material with orthotropic structure on the basis of woven meshes (FMWM), consisting of woven meshes package, is devoid of these disadvantages. The FMWM demonstrates superior dirt capacity due to its operation in depth filter mode. Furthermore, the channels where the pollutant particles are retained can be completely cleaned during the regeneration process with the filter disassembly. In summary, FMWM possesses a practically infinite operational lifespan. The most preferred method for recycling FMWM is by reusing material resources, a practice that eliminates environmental problems during processing. The rational design of FMWM products is based on establishing a relationship between structural parameters and material properties. In the presented work, the problem of forecasting and FMWM performance properties optimization on the basis of mathematical models of the structural parameters' relationship with technological characteristics and properties at limited variation possibilities by controlling factors is solved.

**Keywords:** filtering material, woven meshes, orthotropic structure, mathematical-stochastic model, experiments' planning

**For citations.** Kusin R. A., Dechko M. M., Charniak I. M., Kusin A. R., Rutkovskaya N. V. Optimization of the design of filters with orthotropic structure on the basis of woven meshes at limited possibilities of control factors variation. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2025, vol. 69, no. 3, pp. 234–241 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-234-241>

**Введение.** Для очистки газов и жидкостей от твердых механических примесей как в бытовых, так и в промышленных системах достаточно широко применяются сетчатые фильтрующие материалы (СФМ), имеющие ряд достоинств, обусловленных сочетанием высокой прочности и проницаемости, высокой термостойкостью, способностью к многократной регенерации [1]. Недостатком СФМ является их невысокая грязеемкость, сокращающая ресурс работы до регенерации. Процесс регенерации СФМ затруднен, полностью удалить из ячеек все частицы загрязнений проблематично, сами ячейки подвержены деформации. Фильтрующий материал с ортотропной структурой (ФМТС), состоящий из пакета тканых сеток, в значительной степени лишен указанных недостатков<sup>1</sup>. Поток очищаемой среды в процессе эксплуатации ФМТС направляется параллельно ячейкам, а выходит в перпендикулярном направлении по отношению к первоначальному (через ячейки), что повышает грязеемкость, так как фильтрующий материал работает в режиме глубинного фильтрования; при этом тонкость очистки фильтрующего материала определяется размерами щелей между слоями сеток, а не размерами их ячеек. Очевидно, что щелевые каналы, в которых задерживаются частицы загрязнителя, могут быть полностью очищены в процессе регенерации с разборкой фильтра. Это объясняется тем, что контур этих каналов при разборке становится полностью разомкнутым, что обеспечивает практически неограниченный ресурс работы ФМТС. Однако переориентация потока очищаемой среды и уменьшение размера фильтрующих каналов в поперечном направлении пакета снижает производительность процесса. Рациональное проектирование изделий фильтрующего назначения из ФМТС направлено на поиск компромиссного сочетания тонкости очистки и производительности. Известно, что использование математико-статистических методов при решении различных задач научных исследований позволяет существенно сократить трудоемкость экспериментов, снизить материальные затраты на их проведение и повысить качество полученных результатов [2; 3].

Математическое моделирование процесса получения ФМТС путем построения детерминированной модели, основанной на определении физических закономерностей, описывающих происходящие при этом явления, является очень сложной задачей. Это обусловлено дискретностью параметров исходных материалов – тканых сеток, производимых промышленностью, т. е. существующими ограничениями при варьировании управляющими факторами. Даже если полагаться на современные программные комплексы, например, ANSYS – многоцелевой пакет программ для численного моделирования физических процессов и явлений в области прочности, динамики жидкостей и газов, теплофизики и пр. [4], – решение задачи поиска оптимальных режимов технологического процесса является сложной проблемой. Реальная альтернатива для ее реше-

<sup>1</sup> Пат. 4811 Респ. Беларусь, МПК 7 В 01D 29/44. Щелевой фильтр: заявлено 29.06.1998; опублик. 30.12.2002 / Витязь П. А., Кусин Р. А., Валькович И. В., Капцевич В. М., Круглей В. П.; заявители ГНУ и БГАТУ; Пат. РБ № 949 Респ. Беларусь. У. В 01D 29/00. Композиционный фильтр: заявлено 18.12.2002; опублик. 30.09.2003 / Капцевич В. М., Крутов А. В., Корнеева В. К., Азаров Г. А., Кусин Р. А., Бокань Г. А., Лыков И. Ю., Кусин А. Р.; заявители ГНУ ИПМ, БГАТУ.

ния – методология стохастического моделирования, основанная на построении математических моделей методами математической статистики на основе экспериментальных данных [5].

Цель работы – на примере ФМТС с применением методов математического планирования предложить алгоритм оптимизации свойств разрабатываемых изделий при ограниченных возможностях варьирования факторами.

**Материалы и методы исследования.** Планируемое исследование направлено на поиск оптимальной конструкции фильтра, представляющего собой пакет сеток, образованных ортогональным переплетением волокон (рис. 1). Пакетирование выполняется наложением сеток друг на друга (рис. 2), фильтруемый поток подается на фильтр вдоль волокон.

В качестве исходного материала использован комплект сеток стандартного плетения, характеризующийся диаметром волокна  $d$  (мм) и размером ячейки на просвет  $l$  (мм) (табл. 1). Как видно из таблицы в стандартных сетках исключена возможность независимого варьирования диаметра волокна и размера ячейки. Более того, наблюдается достаточно тесная взаимосвязь этих двух факторов. Поэтому для построения матрицы планирования эксперимента, которая исключит взаимозависимость факторов  $d$  и  $l$ , целесообразно ввести качественный (категориальный) фактор «тип сетки», имеющий 9 фиксированных уровней, определяемых различными диаметрами волокна и размерами ячейки.

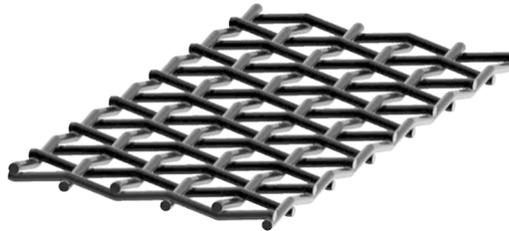


Рис. 1. Конфигурация тканой сетки

Fig. 1. Woven mesh configuration

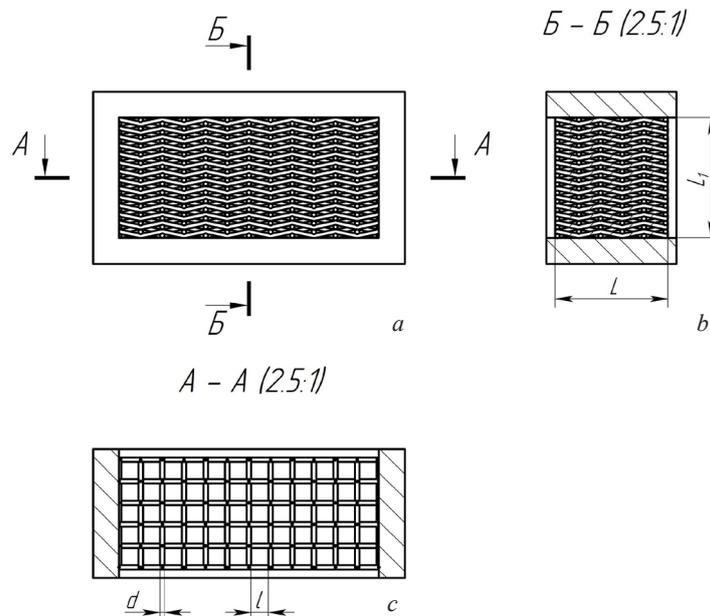


Рис. 2. Экспериментальный образец ФМТС:  $a$  – продольное сечение образца А–А (2,5 : 1);  $b$  – поперечное сечение образца Б–Б (2,5 : 1);  $c$  – вид сверху.  $d$  – диаметр волокна (мм);  $l$  – размер ячейки на просвет (мм);  $L$  – толщина пакета (мм);  $L_1$  – ширина поперечного сечения (мм)

Fig. 2. FMTS experimental sample:  $a$  – longitudinal sample section А–А (2.5 : 1);  $b$  – cross sample section Б–Б (2.5 : 1);  $c$  – top view.  $d$  – fibre diameter (mm);  $l$  – mesh size per lumen (mm);  $L$  – packet thickness (mm);  $L_1$  – cross-section width (mm)

Т а б л и ц а 1. Параметры стандартных сеток

Table 1. Standard meshes parameters

Параметр Parameter	Тип Type								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Диаметр волокна, $d$ , мм	0,063	0,125	0,22	0,25	0,25	0,5	0,5	1,0	2,0
Размер ячейки на просвет $l$ , мм	0,1	0,2	0,415	0,63	1,0	2,0	3,2	10,0	5,0

Толщина пакета  $L$  для сохранения целостности сетчатой структуры должна быть кратна количеству ячеек. Этот количественный фактор фактически является целочисленным и в эксперименте варьируется в условно непрерывном диапазоне. Таким образом, при построении стохастической математической модели для описания свойств фильтра может быть выбрано только два фактора, характеризующих фильтр:

1) тип сетки – качественный (категориальный) фактор, имеющий 9 фиксированных уровней (табл. 1);

2) толщина пакета  $L$  – количественный фактор, кратный целому числу ячеек для фильтра каждого типа.

В качестве конфликтующих параметров оптимизации, характеризующих эксплуатационные свойства ФМТС, выбраны размер пор  $d_{cp}$ , мкм, определяющий тонкость очистки, и коэффициент проницаемости  $K$ ,  $m^2 \cdot 10^{-13}$ , определяющий производительность фильтрации.

Для построения плана эксперимента используется сигма-ограниченная параметризация. На основе точного определения общие линейные модели используются для анализа планов эффектов категориальных предикторов, которые закодированы каким-либо методом. В большинстве случаев использования общих линейных моделей методом параметризации категориальных предикторов может либо сигма-ограниченный метод, либо перепараметризованный. Выбор перепараметризованной модели в качестве параметризации обладает существенным недостатком: эффекты низких порядков категориальных предикторов вместе с эффектами высокого порядка, содержащими взаимодействия, будут избыточными, что может привести к резкой потере качества оценивания. Поэтому мы будем использовать сигма-ограниченный метод, который заменяет 9-уровневый фактор «тип сетки» на комбинацию из двух ортогональных трехуровневых факторов (табл. 2). Для расчета коэффициентов модели реализован эксперимент, матрица плана которого представлена в табл. 3.

Т а б л и ц а 2. Параметризация типа сетки

Table 2. Mesh type parameterisation

	Номер образца Sample number								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$X_1^{(1)}$	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1
$X_1^{(2)}$	-1	-1	-1	0	0	0	1	1	1

Т а б л и ц а 3. Результаты исследования и расчетные значения параметров

Table 3. Results and calculated parameters values

№ опыта Experiment No.	Натуральные значения факторов Natural values of factors				Кодированные значения факторов Coded values of factors			Размер пор, $d_{cp}$ , мкм Pore size, $d_{cp}$ , $\mu m$		Коэффициент проницаемости, $K$ , $m^2 \cdot 10^{13}$ Permeability coefficient, $K$ , $m^2 \cdot 10^{13}$	
	Диаметр волокна, $d$ , мм Fiber diameter, $d$ , mm	Размер ячейки, $l$ , мм Cell size, $l$ , mm	Тип Type	Толщина материала, $L$ , шт. Material thickness, $L$ , pcs.	$X_1^{(1)}$	$X_1^{(2)}$	$X_2$	Эксп. Exp.	Расч. Calc.	Эксп. Exp.	Расч. Calc.
1	0,063	0,1	1	5	-1	-1	-0,579	32	32,3	120	120,6
2	0,063	0,1	1	10	-1	-1	-0,053	32	31,6	118	117,1
3	0,063	0,1	1	20	-1	-1	1	30	30,1	110	110,3

№ опыта Experiment No.	Натуральные значения факторов Natural values of factors				Кодированные значения факторов Coded values of factors			Размер пор, $d_{cp}$ , мкм Pore size, $d_{cp}$ , $\mu\text{m}$		Коэффициент проницаемости, $K$ , $\text{м}^2 \cdot 10^{13}$ Permeability coefficient, $K$ , $\text{m}^2 \cdot 10^{13}$	
	Диаметр волокна, $d$ , мм Fiber diameter, $d$ , mm	Размер ячейки, $l$ , мм Cell size, $l$ , mm	Тип Type	Толщина материала, $L$ , шт. Material thickness, $L$ , pcs.	$X_1^{(1)}$	$X_1^{(2)}$	$X_2$	Эксп. Exp.	Расч. Calc.	Эксп. Exp.	Расч. Calc.
4	0,125	0,2	2	5	0	-1	-0,579	50	49,4	170	168,1
5	0,125	0,2	2	10	0	-1	-0,053	48	48,9	164	166,8
6	0,125	0,2	2	20	0	-1	1	48	47,7	165	164,1
7	0,22	0,415	3	5	1	-1	-0,579	75	75,6	570	588,8
8	0,22	0,415	3	10	1	-1	-0,053	74	73,1	564	535,7
9	0,22	0,415	3	20	1	-1	1	68	68,3	420	429,4
10	0,25	0,63	4	5	-1	0	-0,579	78	78,0	690	690,0
11	0,25	0,63	4	10	-1	0	-0,053	70	70,0	605	605,0
12	0,25	1	5	5	0	0	-0,579	108	108,0	1312	1312,0
13	0,25	1	5	10	0	0	-0,053	100	100,0	1255	1255,0
14	0,5	2	6	1	1	0	-1	114	114,0	2480	2480,0
15	0,5	2	6	3	1	0	-0,789	110	110,0	2400	2400,0
16	0,5	3,2	7	1	-1	1	-1	99	99,0	2300	2300,0
17	0,5	3,2	7	3	-1	1	-0,789	94	94,0	2200	2200,0
18	1,0	10	8	1	0	1	-1	210	210,0	3940	3940,0
19	1,0	10	8	3	0	1	-0,789	190	190,0	2780	2780,0
20	2,0	5	9	1	1	1	-1	480	480,0	6700	6700,0
21	2,0	5	9	3	1	1	-0,789	468	468,0	5940	5940,0

В качестве модели, описывающей искомую зависимость, принимается общая линейная по параметрам модель от двух главных факторов, их взаимодействия и квадратичного эффекта количественного фактора  $Y$ :

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^9 b_1^{(i-1)} X_1^{(i-1)} + b_2 X_2 + \sum_{i=1}^9 b_{12}^{(i-1)} X_1^{(i-1)} X_2 + b_{22} X_2^2, \quad (1)$$

где  $b$  – коэффициенты регрессии и ковариации;  $X_1^{(i-1)}$  –  $i$ -тип сетки,  $i = 1 \dots 9$ ;  $X_2$  – толщина материала, кратная целому числу ячеек фильтра, нормированная на отрезке  $\pm 1$ .

Оба параметра по своей физической природе могут принимать только положительные значения, поэтому для построения регрессионных моделей использованы логарифмические преобразования:  $Y_1 = \ln(d_{cp})$  и  $Y_2 = \ln(K)$ .

Коэффициенты уравнения (1) рассчитывались в программе Statistica (TIBCO Software) с использованием процедуры обобщенной линейной модели регрессии методом пошагового исключения статистически незначимых коэффициентов. Полученные результаты представлены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4. Коэффициенты регрессии для расчета параметров  $\ln(d_{cp})$  и  $\ln(K)$  по уравнению (1)

Table 4. Regression coefficients for parameters calculation  $\ln(d_{mid})$  and  $\ln(K)$  by equation (1)

Коэффициент Coefficient	Параметр Parameter	
	$\ln(d_{cp})$	$\ln(K)$
$b_0$	4,4782	6,6356
$b_1^{(1)}$	-1,0286	-1,8758
$b_1^{(2)}$	-0,5905	-1,5197
$b_1^{(3)}$	-0,1899	-0,3695
$b_1^{(4)}$	-0,2406	-0,2436
$b_1^{(5)}$	0,1192	0,4948

Окончание табл. 4

Коэффициент Coefficient	Параметр Parameter	
	$\ln(d_{cp})$	$\ln(K)$
$b_1^{(6)}$	0,0888	1,0250
$b_1^{(7)}$	-0,1287	0,8944
$b_1^{(8)}$	0,3946	незнач.
$b_2$	-0,1657	-0,3545
$b_{12}^{(1)}$	0,1224	0,2982
$b_{12}^{(2)}$	0,1431	0,3389
$b_{12}^{(3)}$	0,1017	0,1595
$b_{12}^{(4)}$	-0,0401	0,1046
$b_{12}^{(5)}$	0,0194	0,2701
$b_{12}^{(6)}$	незнач.	0,1991
$b_{12}^{(7)}$	-0,0799	0,1439
$b_{12}^{(8)}$	-0,3087	-1,2982
$b_{22}$	незнач.	незнач.

**Результаты и их обсуждение.** Для обоих параметров в логарифмических координатах квадратичный эффект количественного фактора – толщина материала  $L$  – статистически незначим в исследованном диапазоне, а его линейный эффект отрицательный. При этом значимые эффекты взаимодействия факторов показывают, что влияние толщины материала проявляется в различной степени для каждого типа ФМТС.

Для наглядного представления полученных зависимостей и их практического применения для прогнозирования эксплуатационных параметров ФМТС на основе стандартных сеток построены номограммы зависимостей исследованных параметров от варьируемых факторов (рис. 3, 4). «Пустые» области на графиках представляют диапазоны, в которых отсутствуют экспериментальные значения, а экстраполяция по уравнениям дает большую погрешность.

Между исследованными в данном эксперименте параметрами ФМТС  $K$  и  $d_{cp}$  наблюдается тесная положительная взаимосвязь (коэффициент парной корреляции 0,95). Поэтому отсутствует оптимальное решение, которое обеспечит одновременно высокую степень очистки при высокой проницаемости материала.

Представленные результаты исследований позволяют спрогнозировать основные эксплуатационные характеристики ФМТС, сконструированные из рассмотренных выше тканых сеток, а также провести оптимизацию получаемых изделий с целью достижения максимально возмож-

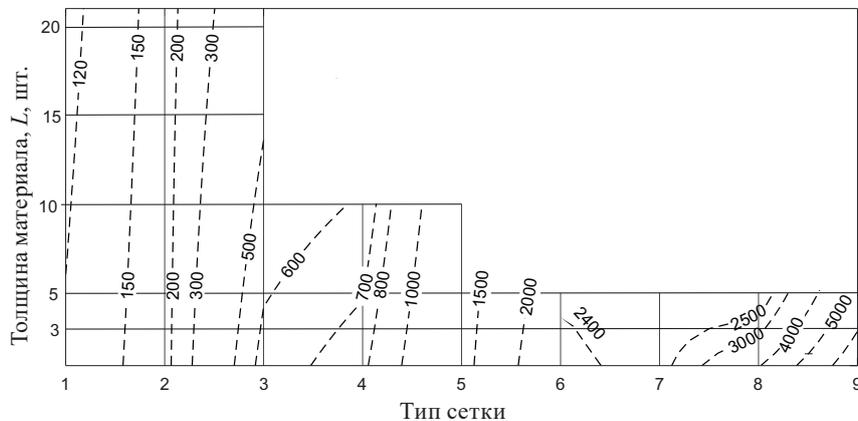


Рис. 3. Номограмма зависимости размера пор  $d_{cp}$ , мкм, ФМТС от типа материала и его толщины

Fig. 3. Nomogram of pore size  $d_{mid}$ ,  $\mu\text{m}$ , FMWM dependence on material type and its thickness

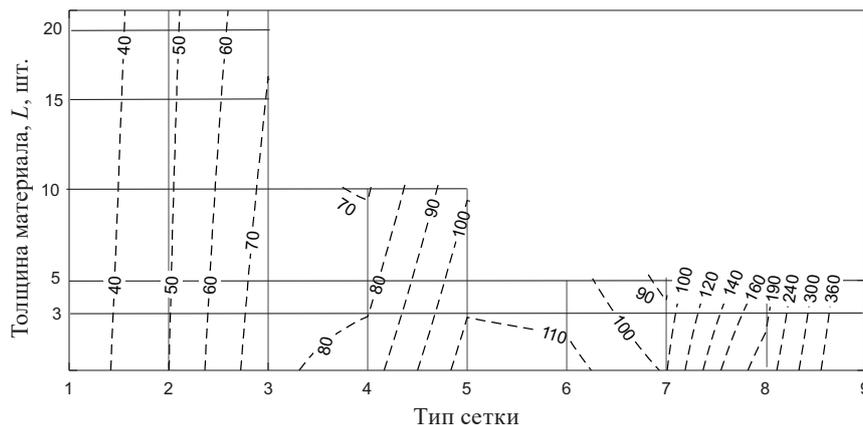


Рис. 4. Номограмма зависимости коэффициента проницаемости  $K$ ,  $\times 10^{-13}$ ,  $\text{м}^2$ , ФМТС от типа материала и его толщины

Fig. 4. Nomogram of permeability coefficient  $K$ ,  $\times 10^{-13}$ ,  $\text{m}^2$ , FMWM dependence on the material type and its thickness

ной пропускной способности при заданном размере пор. Например, при размере пор 94 мкм может быть рекомендовано использовать Тип 7, обеспечивающий получение ФМТС с максимальным значением коэффициента проницаемости ( $2200 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$ ).

**Закключение.** Выполнено экспериментальное исследование, направленное на поиск оптимальной конструкции сетчатого фильтра, представляющего собой пакет уложенных друг на друга сеток ФТМС. Построен план эксперимента с применением сигма-ограниченной параметризации, позволяющий варьировать в качестве управляющего фактора тип стандартных сеток. На основе данных, полученных по плану эксперимента, рассчитаны коэффициенты регрессии для размера пор  $d_{\text{cp}}$ , мкм, определяющие тонкость очистки, и коэффициент проницаемости  $K$ ,  $\times 10^{-13}$ ,  $\text{м}^2$ , определяющий производительность фильтрации в зависимости от типа сетки и толщины материала. Для иллюстрации полученных зависимостей и практического использования при выборе ФМТС построены номограммы, которые позволяют прогнозировать эксплуатационные параметры. Представлен пример оптимизации эксплуатационных параметров ФТМС.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» подпрограмма «Многофункциональные и композиционные материалы» задание 4.1.12.

**Acknowledgements.** The work was carried out with the financial support of the State Program of Scientific Research “Materials Science, New Materials and Technologies”, subprogram “Multifunctional and Composite Materials”, task 4.1.12.

### Список использованных источников

1. Синельников, Ю. И. Пористые сетчатые материалы / Ю. И. Синельников. – М., 1983. – 64 с.
2. Новиков, А. М. Методология научного исследования / А. М. Новиков, Д. А. Новиков. – М., 2006. – 280 с.
3. Hoel, P. G. Introduction to Mathematical Statistics / P. G. Hoel. – 5th ed. – Wiley, 1984. – 448 p.
4. Основы работы в ANSYS 17 / Н. Н. Федорова, С. А. Вальгер, М. Н. Данилов, Ю. В. Захарова. – М., 2017. – 210 с.
5. Винарский, М. С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М. С. Винарский, М. В. Лурье. – Киев, 1975. – 168 с.

### References

1. Sinelnikov Yu. I. *Porous mesh material*. Moscow, 1983. 64 p. (in Russian).
2. Novikov A. M., Novikov D. A. *Scientific research methodology*. Moscow, 2006. 280 p. (in Russian).
3. Hoel P. G. *Introduction to Mathematical Statistics*. 5th ed. Wiley, 1984. 448 p.
4. Fedorova N. N., Valger S. A., Danilov M. N., Zakharova Yu. V. *The basics of working in a ANSYS 17*. Moscow, 2017. 210 p. (in Russian).
5. Vinarskiy M. S., Lurye M. V. *Experiment planning in technological research*. Kyiv, 1975. 168 p. (in Russian).

**Информация об авторах**

*Кусин Руслан Анатольевич* – канд. техн. наук, доцент, вед. науч. сотрудник. Институт порошковой металлургии им. акад. О. В. Романа (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nil23@pminstitute.by.

*Черняк Ирина Николаевна* – заведующий лабораторией. Институт порошковой металлургии им. акад. О. В. Романа (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nil23@pminstitute.by.

*Дечко Михаил Михайлович* – канд. техн. наук, доцент, инженер. Открытое акционерное общество «ЛМЗ Универсал» (ул. Заводская, 4, 223710, г. Солигорск, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: mdechko@rambler.ru.

*Кусин Алексей Русланович* – магистр техн. наук, науч. сотрудник. Институт порошковой металлургии им. акад. О. В. Романа (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nil23@pminstitute.by.

*Рутковская Наталия Викторовна* – ст. преподаватель, аспирант. Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: rnatvikk@mail.ru.

**Information about the authors**

*Kusin Ruslan A.* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher. O. V. Roman Powder Metallurgy Institute (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nil23@pminstitute.by.

*Charniak Iryna M.* – Head of the Laboratory. O. V. Roman Powder Metallurgy Institute (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nil23@pminstitute.by.

*Dechko Mikhail M.* – Ph. D. (Engineering), Professor, Engineer. JSC “LMZ Universal” (4, Zavodskaya Str., 223710, Soligorsk, Minsk region, Republic of Belarus). E-mail: mdechko@rambler.ru.

*Kusin Aleksey R.* – Master of Engineering Science, Researcher. O. V. Roman Powder Metallurgy Institute (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nil23@pminstitute.by.

*Rutkovskaya Nataliya V.* – Senior Lecturer, Postgraduate Student. Belarusian State Agrarian Technical University (99, Independence Ave., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rnatvikk@mail.ru.