

## ПРОНИЦАЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ ИЗ МЕДНЫХ КАБЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ. СООБЩЕНИЕ 6. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНЫХ ТРУБЧАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ МЕДНЫХ КАБЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СУХОГО ИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ

В. М. Капцевич, В. К. Корнеева

Белорусский государственный аграрный технический университет,  
пр. Независимости, 99, 220023, г. Минск, Беларусь, e-mail: lerakor1974@mail.ru

Поступила 06.09.2017 г.

*На основании ранее проведенных экспериментальных исследований предложена методика, позволяющая спрогнозировать геометрические параметры (толщины слоев) и гидродинамические свойства многослойных фильтрующих волоконных материалов и оценивать параметры их эффективности.*

**Введение.** Разработка новых фильтровальных систем требует создания фильтрующих материалов, обеспечивающих высокую производительность процесса фильтрации, требуемую тонкость очистки и длительный срок службы. К материалам, с помощью которых возможно решение этих вопросов, относятся многослойные материалы, в которых каждый слой выполнен из структурных элементов различного гранулометрического состава. В работе [1] впервые в практике порошковой металлургии исследованы свойства медных кабельных отходов (МКО) различного гранулометрического состава и предложено их использование для изготовления фильтрующих волоконных материалов (ФВМ). В работе [2] исследованы закономерности и отличительные особенности уплотнения МКО методом сухого изостатического прессования (СИП), а в работе [3] установлена взаимосвязь между структурными и гидродинамическими свойствами ФВМ из МКО. В работе [4] изучены закономерности укладки волокон в узкие кольцевые зазоры, а в работе [5] предложен усовершенствованный метод СИП, позволяющий управлять толщинами слоев многослойных ФВМ из МКО.

**Цель работы** – разработка методики прогнозирования свойств и оценки эффективности многослойных ФВМ, используя ранее полученные экспериментальные данные по закономерности уплотнения и взаимосвязи между структурными и гидродинамическими свойствами ФВМ, полученных методом СИП из МКО.

**Основная часть.** Процесс получения многослойных ФВМ методом СИП основан на засыпке волокон заданного гранулометрического состава в кольцевой зазор между формообразующим металлическим стержнем диаметром  $D_0$  и эластичной матрицей с внутренним диаметром  $D_m$ , прессовании под давлением, обеспечивающим получение прессовки требуемой плотности  $\rho_{п1}$  (пористости  $1 - \rho_{п1}$ ) диаметром  $D_1$ , повторной засыпки волокон другого гранулометрического состава в кольцевой зазор между прессовкой диаметром  $D_1$  и матрицей с внутренним диаметром  $D_m$  и повторного прессования с получением двухслойной прессовки с плотностью второго слоя  $\rho_{п2}$  (пористостью  $1 - \rho_{п2}$ ) (рис. 1). Процесс дальнейшей засыпки волокон требуемого гранулометрического состава и последующего прессования может осуществляться многократно. При этом при каждой последующей засыпке и прессовании диаметр прессовки возрастает от  $D_1$  до  $D_2, \dots, D_{n-1}, D_n$ , изменяется также плотность каждого напрессованного слоя от  $\rho_{п1}$  до  $\rho_{п2}, \dots, \rho_{п(n-1)}, \rho_{пn}$ .

В процессе засыпки каждого слоя следует учитывать плотность укладки в кольцевой зазор, которая, как было установлено экспериментально [4], зависит как от размера зазора, так и от гранулометрического состава волокон.

Плотность напрессованного слоя может быть определена из полученных ранее уравнений прессования [2].

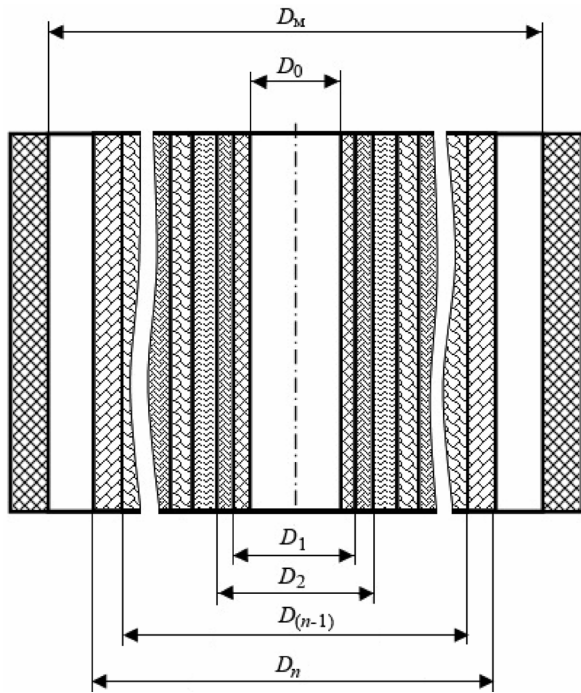


Рис. 1. Схема многослойного ФВМ

Пусть при прессовании первого слоя плотность засыпки составляла  $\rho_{н1}$ , второго –  $\rho_{н2}$ , ...,  $(n-1)$ -го –  $\rho_{н(n-1)}$ ,  $n$ -го –  $\rho_{нn}$ . Очевидно, что масса засыпанных волокон в кольцевой зазор равна массе прессовки. Тогда после прессования первого, второго, ...,  $(n-1)$ -го,  $n$ -го слоев равенство масс можно записать, соответственно:

$$\begin{cases} \rho_{н1}V_{н1} = \rho_{п1}V_{п1}, \\ \rho_{н2}V_{н2} = \rho_{п2}V_{п2}, \\ \dots \\ \rho_{н(n-1)}V_{н(n-1)} = \rho_{п(n-1)}V_{п(n-1)}, \\ \rho_{нn}V_{нn} = \rho_{пn}V_{пn}, \end{cases}$$

где  $V_{н1}$ ,  $V_{н2}$ , ...,  $V_{н(n-1)}$ ,  $V_{нn}$  – объемы кольцевых зазоров первого, второго, ...,  $(n-1)$ -го,  $n$ -го слоев, соответственно;  $V_{п1}$ ,  $V_{п2}$ , ...,  $V_{п(n-1)}$ ,  $V_{пn}$  – объемы прессовок при прессовании первого, второго, ...,  $(n-1)$ -го,  $n$ -го слоев, соответственно.

Из равенства масс засыпки волокон и масс прессовки каждого слоя, рассчитав объемы кольцевых зазоров и объемы прессовок, можно определить наружные диаметры однослойных и многослойных ФВМ:

для однослойного ФВМ

$$D_1 = \sqrt{D_0^2 + \frac{\rho_{н1}}{\rho_{п1}}(D_M^2 - D_0^2)},$$

для двухслойного

$$D_2 = \sqrt{D_1^2 + \frac{\rho_{н2}}{\rho_{п2}}(D_M^2 - D_1^2)},$$

...

для  $(n-1)$ -слойного

$$D_{(n-1)} = \sqrt{D_{(n-1)-1}^2 + \frac{\rho_{н(n-1)}}{\rho_{п(n-1)}}(D_M^2 - D_{(n-1)-1}^2)},$$

для  $n$ -слойного

$$D_n = \sqrt{D_{(n-1)}^2 + \frac{\rho_{нn}}{\rho_{пn}}(D_M^2 - D_{(n-1)}^2)}.$$

Полученные выражения позволяют рассчитать наружные диаметры каждого напрессованного слоя.

Зная наружные диаметры  $D_1, D_2, \dots, D_{n-1}, D_n$  и экспериментально определенные коэффициенты проницаемости каждого слоя  $k_1, k_2, \dots, k_{n-1}, k_n$  можно рассчитать коэффициент проницаемости многослойного ФВМ [6]:

$$k_{эф} = \frac{\ln \frac{D_0}{D_n}}{\left( \frac{\ln \frac{D_0}{D_1}}{k_1} + \frac{\ln \frac{D_1}{D_2}}{k_2} + \dots + \frac{\ln \frac{D_{(n-1)}}{D_n}}{k_n} \right)} = \frac{\ln \frac{D_0}{D_n}}{\sum_{i=1}^n \frac{\ln \frac{D_{(i-1)}}{D_i}}{k_i}}.$$

**Результаты расчетов.** Используем предложенный метод для расчета свойств многослойных ФВМ, полученных методом СИП при давлениях прессования  $P$ , равных 80, 100, 120 и 140 МПа, МКО-фракции  $(-0,2...+0,1)$ ,  $(-0,315...+0,2)$ ,  $(-0,4...+0,315)$  и  $(-0,63...+0,4)$  мм. Для всех рассматриваемых многослойных ФВМ несущий (внутренний) слой выполнен из МКО-фракции  $(-0,63...+0,4)$  мм, фильтрующий (наружный) – из МКО-фракции  $(-0,2...+0,1)$  мм, а промежуточные слои – из фракций  $(-0,315...+0,2)$  и  $(-0,4...+0,315)$  мм. Для всех многослойных ФВМ размеры пор  $d_{п ср}$  определялись размерами пор фильтрующего слоя. При проведении расчетов предполагали, что технологическая оснастка для прессования состоит из металлического формообразующего стержня диаметром  $D_0 = 30$  мм и эластичной матрицы внутренним диаметром  $D_M = 50$  мм. Для проведения расчетов использовались ранее полученные экспериментальные

данные для всех рассматриваемых фракций: плотность насыпки  $\rho_n$  [4], плотность прессовки  $\rho_p$  [3] и коэффициент проницаемости  $k$  [3].

Рассчитаны свойства следующих вариантов многослойных ФВМ:

двухслойного ФВМ из МКО-фракций  $(-0,63...+0,4)$  и  $(-0,2...+0,1)$  мм (табл. 1);

трехслойных ФВМ из МКО-фракций  $(-0,63...+0,4)$ ,  $(-0,315...+0,2)$  и  $(-0,2...+0,1)$  мм (табл. 2), и из МКО-фракций  $(-0,63...+0,4)$ ,  $(-0,4...+0,315)$  и  $(-0,2...+0,1)$  мм (табл. 3);

четырёхслойного ФВМ из МКО-фракций  $(-0,63...+0,4)$ ,  $(-0,4...+0,315)$ ,  $(-0,315...+0,2)$  и  $(-0,2...+0,1)$  мм (табл. 4).

Таблица 1. Свойства двухслойного ФВМ из МКО-фракций

$P$ , МПа	$D_1$ , мм	$D_2$ , мм	$k_1$ , мкм <sup>2</sup>	$k_2$ , мкм <sup>2</sup>	$k_{\text{эф}}$ , мкм <sup>2</sup>	$d_{\text{п ср}}$ , мкм	$E_1$
80	43,56	47,67	49,3	19,2	37,76	31	0,1982
100	42,79	47,12	48,9	19,0	36,60	29	0,2086
120	42,19	46,65	43,9	12,5	27,94	24	0,2202
140	41,71	46,24	37,1	9,5	21,91	22	0,2128

Таблица 2. Свойства трехслойного ФВМ из МКО-фракций

$P$ , МПа	$D_1$ , мм	$D_2$ , мм	$D_3$ , мм	$k_1$ , мкм <sup>2</sup>	$k_2$ , мкм <sup>2</sup>	$k_3$ , мкм <sup>2</sup>	$k_{\text{эф}}$ , мкм <sup>2</sup>	$d_{\text{п ср}}$ , мкм	$E_1$
80	43,56	47,67	48,42	49,3	31,2	19,2	41,85	31	0,2087
100	42,79	47,12	48,03	48,9	25,4	19,0	38,65	29	0,2144
120	42,19	46,65	47,69	43,9	19,1	12,5	30,85	24	0,2314
140	41,71	46,24	47,39	37,1	16,2	9,5	25,13	22	0,2279

Таблица 3. Свойства трехслойного ФВМ из МКО-фракций

$P$ , МПа	$D_1$ , мм	$D_2$ , мм	$D_3$ , мм	$k_1$ , мкм <sup>2</sup>	$k_2$ , мкм <sup>2</sup>	$k_3$ , мкм <sup>2</sup>	$k_{\text{эф}}$ , мкм <sup>2</sup>	$d_{\text{п ср}}$ , мкм	$E_1$
80	43,56	48,03	48,85	49,3	42,6	19,2	45,37	31	0,2173
100	42,79	47,42	48,45	48,9	38,3	19,0	43,29	29	0,2269
120	42,19	46,92	48,09	43,9	34,2	12,5	36,72	24	0,2525
140	41,71	46,47	47,77	37,1	30,9	9,5	30,45	22	0,2508

Таблица 4. Свойства четырехслойного ФВМ из МКО-фракций

$P$ , МПа	$D_1$ , мм	$D_2$ , мм	$D_3$ , мм	$D_4$ , мм	$k_1$ , мкм <sup>2</sup>	$k_2$ , мкм <sup>2</sup>	$k_3$ , мкм <sup>2</sup>	$k_4$ , мкм <sup>2</sup>	$k_{\text{эф}}$ , мкм <sup>2</sup>	$d_{\text{п ср}}$ , мкм	$E_1$
80	43,56	48,02	49,14	49,50	49,3	42,6	31,2	19,2	45,64	31	0,2179
100	42,79	47,42	48,80	49,27	48,9	38,3	25,4	19,0	42,85	29	0,2257
120	42,19	46,92	48,48	49,05	43,9	34,2	19,1	12,5	36,34	24	0,2512
140	41,71	46,47	48,19	48,85	37,1	30,9	16,2	9,5	30,38	22	0,2505

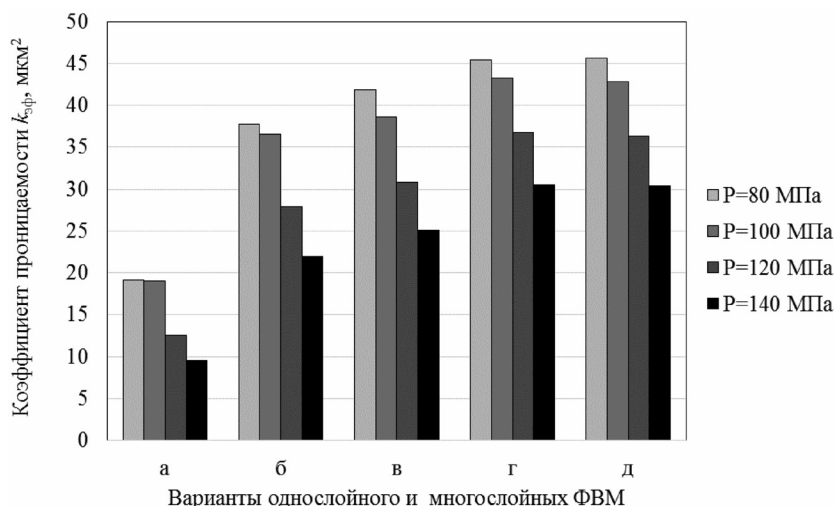


Рис. 2. Значения коэффициентов проницаемости в зависимости от давления прессования: а – однослойного ФВМ из МКО-фракции  $(-0,2...+0,1)$  мм; б – двухслойного ФВМ из МКО-фракций  $(-0,63...+0,4)$  и  $(-0,2...+0,1)$  мм; в – трехслойного ФВМ из МКО-фракций  $(-0,63...+0,4)$ ,  $(-0,315...+0,2)$  и  $(-0,2...+0,1)$  мм; г – трехслойного ФВМ из МКО-фракций  $(-0,63...+0,4)$ ,  $(-0,4...+0,315)$  и  $(-0,2...+0,1)$  мм; д – четырехслойного ФВМ из МКО-фракций  $(-0,63...+0,4)$ ,  $(-0,4...+0,315)$ ,  $(-0,315...+0,2)$  и  $(-0,2...+0,1)$  мм

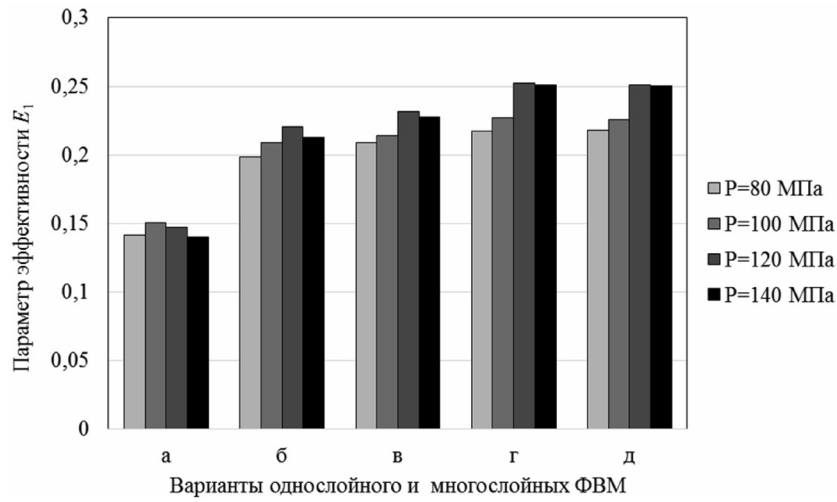


Рис. 3. Значения параметра эффективности в зависимости от давления прессования (а–д – см. рис. 2)

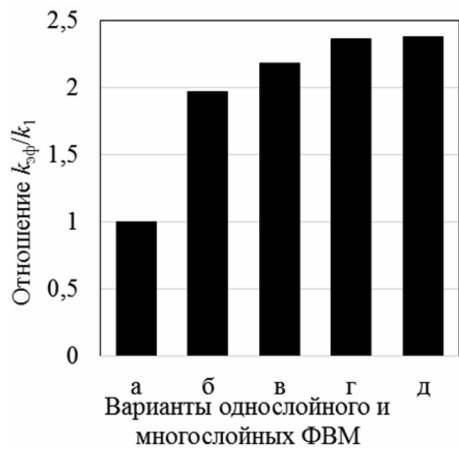


Рис. 4. Изменение (возрастание) коэффициентов проницаемости многослойных ФВМ по сравнению с однослойным при давлении прессования 80 МПа (а–д – см. рис. 2)

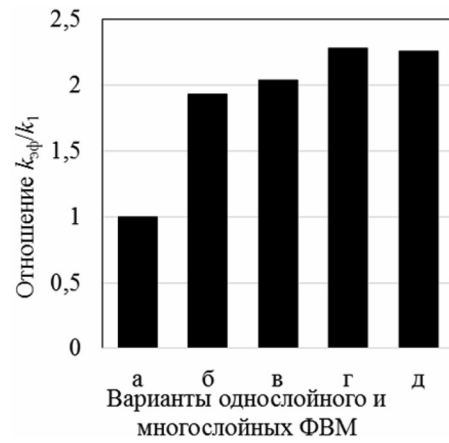


Рис. 5. Изменение (возрастание) коэффициентов проницаемости многослойных ФВМ по сравнению с однослойным при давлении прессования 100 МПа (а–д – см. рис. 2)

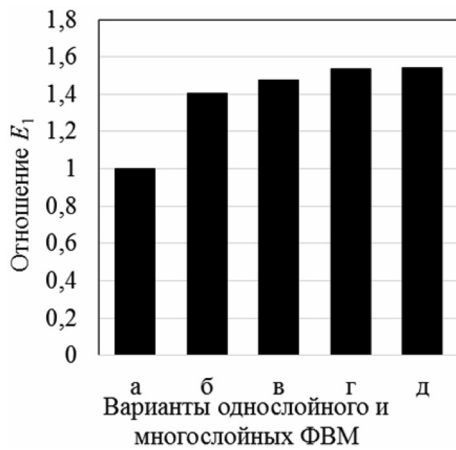


Рис. 6. Изменение (возрастание) параметра эффективности  $E_1$  многослойных ФВМ по сравнению с однослойным при давлении прессования 80 МПа (а–д – см. рис. 2)

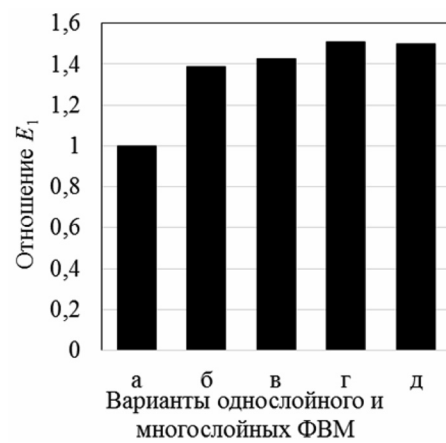


Рис. 7. Изменение (возрастание) параметра эффективности  $E_1$  многослойных ФВМ по сравнению с однослойным при давлении прессования 100 МПа (а–д – см. рис. 2)

Результаты расчетов коэффициентов проницаемости  $k_{эф}$  и параметров эффективности  $E_1$  ( $E_1 = \sqrt{k}/d_{п.ср}$ ) многослойных ФВМ из МКО при различных давлениях прессования представлены на рис. 2 и 3 соответственно.

В качестве примеров показано изменение (возрастание) коэффициентов проницаемости и параметров эффективности многослойных ФВМ по сравнению с однослойным при давлениях прессования 80 МПа (рис. 4, 6) и 100 МПа (рис. 5, 7).

**Заключение.** На основании ранее проведенных экспериментальных исследований предложена методика, позволяющая прогнозировать геометрические параметры и гидродинамиче-

ские свойства многослойных ФВМ и оценивать параметры их эффективности.

Анализ рассчитанных величин коэффициента проницаемости и параметра эффективности показывает, что эти величины для двухслойного ФВМ возрастают по сравнению с однослойным в 2 и 1,4 раза соответственно, для трехслойного – в 2,3 и 1,5 раза соответственно. Дальнейшее увеличение количества слоев практически не приводит к увеличению коэффициента проницаемости и параметра эффективности.

При решении практических задач во многих случаях, с нашей точки зрения, целесообразно ограничиться созданием двухслойных ФВМ.

### Литература

1. **Маршина, Е. А.** Исследование структурных и гидродинамических свойств пористых волокнистых материалов из медных волокон / Е. А. Маршина, В. А. Вольский, В. М. Капцевич // Новые материалы и технологии их обработки: сб. науч. работ IX Респ. студ. науч.-техн. конф. – Минск: Метолит, 2008. – С. 145–146.

2. **Ильющенко, А. Ф.** Проницаемые материалы из медных кабельных отходов. Сообщение 2. Закономерности уплотнения медных волоконных отходов / А. Ф. Ильющенко, В. М. Капцевич, В. К. Корнеева // Порошковая металлургия: сб. науч. ст. / Нац. акад. наук Беларуси [и др.]; редкол.: П. А. Витязь (гл. ред.); [и др.]. – Минск, 2013. – Вып. 36. – С. 250–256.

3. **Ильющенко, А. Ф.** Проницаемые материалы из медных кабельных отходов. Сообщение 3. Взаимосвязь структурных и гидродинамических свойств проницаемых материалов из медных волоконных отходов, полученных методом сухого изостатического прессования / А. Ф. Ильющенко, В. М. Капцевич, В. К. Корнеева // Порошковая металлургия: сб. науч. ст. / Нац. акад. наук Беларуси [и др.]; редкол.: А. Ф. Ильющенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2014. – Вып. 37. – С. 121–126.

4. **Капцевич, В. М.** Особенности укладки медных волоконных отходов при засыпке в кольцевые зазоры при получении длинномерных фильтроэлементов методом СИП / В. М. Капцевич, В. К. Корнеева // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: матер. 12-й Междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 25–27 мая 2016 г.) / Нац. акад. наук Беларуси [и др.]; редкол.: А. Ф. Ильющенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2016. – С. 81–84.

5. **Проницаемые материалы из медных кабельных отходов.** Сообщение 4. Совершенствование метода сухого изостатического прессования для изготовления композиционных многослойных трубчатых фильтроэлементов на основе медных волоконных отходов / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Порошковая металлургия: сб. науч. ст. / Нац. акад. наук Беларуси [и др.]; редкол.: А. Ф. Ильющенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – Вып. 38. – С. 162–165.

6. **Проницаемые материалы из металлических волокон: свойства, технологии изготовления, перспективы применения** / В. М. Капцевич [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2013. – 380 с.

### PERMEABLE MATERIALS MADE OF COPPER CABLE WASTES MESSAGE 6. FORECASTING THE PROPERTIES OF MULTILAYER TUBE ELEMENTS BASED ON COPPER CABLE WASTES PRODUCED BY DRY ISOSTATIC PRESSING TECHNIQUE

V. M. Kaptsевич, V. K. Korneeva

Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus, e-mail: lerakor1974@mail.ru

According to earlier conducted experimental studies, a technique has been proposed that allows forecasting geometric parameters (layer thickness) and hydrodynamic properties of multilayer filter fiber materials and evaluating the parameters of their efficiency.