

УДК 628.543.1

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ФИЛЬТРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА ИЗ НЕТКАНОГО ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА

<sup>1</sup>Христофорова М.И., <sup>2</sup>Хролынцев А.А., <sup>1</sup>Яковлева О.В.

<sup>1</sup>Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, e-mail: mashaapril@mail.ru,  
yakowlewaolga24@mail.ru;

<sup>2</sup>АО «Фильтр», Товарково, e-mail: antonische\_x@mail.ru

Настоящая статья посвящена разработке методики расчета оптимальной структуры фильтрующего элемента микрофильтра, который используется для достижения требований к качеству воды, идущей на установки обратного осмоса. На основании исследования строения фильтрующего элемента микрофильтра из нетканого полимерного волокнистого материала выявлено, что критерием оптимальности его структуры является максимальная грязеемкость при заданном гранулометрическом составе твердых частиц в фильтруемой жидкости. Разработана методика расчета параметров фильтрующих элементов. Получена зависимость удельного воздушного сопротивления фильтрующего материала от давления воздуха на регуляторе. Представленная методика расчета параметров фильтрующих элементов из нетканого полимерного волокнистого материала может быть использована при изготовлении фильтров с оптимальными характеристиками по грязеемкости, перепаду давлений и тонкости фильтрации для заданных условий эксплуатации.

**Ключевые слова:** фильтроэлемент из нетканого полимерного волокнистого материала, фильтрующий слой, грязеемкость, тонкость очистки, перепад давления

## CALCULATION METHOD OF OPTIMAL STRUCTURE OF FILTER ELEMENT FROM NONWOVEN POLYMERIC MATERIAL

<sup>1</sup>Khristoforova M.I., <sup>2</sup>Khrolyntsev A.A., <sup>1</sup>Yakovleva O.V.

<sup>1</sup>Kaluga branch of the Bauman MSTU, Kaluga, e-mail: mashaapril@mail.ru,  
yakowlewaolga24@mail.ru;

<sup>2</sup>JSC «Filter», Tovarkovo, e-mail: antonische\_x@mail.ru

This article is dedicated to the development of a technique for calculating the optimal structure of the filter element of the microfilter, which is used to achieve the water quality requirements for reverse osmosis plants. Based on the study of the structure of the filter element of the microfilter made of non-woven polymeric fibrous material, it was found that the criterion for optimality of its structure is the maximum contaminant capacity at a given granulometric composition of solid particles in the filtered liquid. Designed the method of calculating the parameters of the filter elements. Received the dependence of the specific resistance of the air of filter material from the regulator air pressure. The presented method of calculating the parameters of filter elements from a non-woven polymeric fibrous material can be used in the manufacture of filters with optimal characteristics for contaminant capacity, pressure drop and filtration fineness for given operating conditions.

**Keywords:** filter element of a nonwoven polymeric fibrous material, filtration layer, contaminant capacity, fineness of purification, pressure drop

В настоящее время для получения воды высокого качества для различных целей широко используются обратноосмотические установки, для успешной эксплуатации которых требуется предварительная очистка воды на микрофильтрах [1]. Микрофильтры выполняются из различных материалов, на сегодняшний день широкое распространение получили фильтрующие элементы из нетканого полимерного материала [2].

Основными характеристиками фильтрующих элементов являются эффективность и грязеемкость. Обеспечение требуемых характеристик эффективности и максимальной грязеемкости установок микрофильтрации является необходимым условием для успешной работы установок обратного осмоса [3].

Целью работы являлась разработка методики расчета параметров фильтрующих

элементов из нетканого полимерного материала, позволяющей изготавливать фильтры с оптимальными характеристиками по грязеемкости, перепаду давлений и тонкости фильтрации.

### Проведение исследования и оборудование

Для проведения расчета параметров работы фильтрующих элементов из нетканого полимерного материала предварительно проведено исследование их строения и определены основные технологические характеристики работы.

### Исследование строения фильтрующего элемента микрофильтра

Объектом исследования являлся фильтрующий элемент для очистки жидкостей от

механических примесей, изготовленный по технологии близкой к «meltblown», но имеющей свои особенности, которые позволяют более гибко регулировать параметры поровой структуры фильтрующего слоя (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид фильтрующего элемента

Структура исследуемого фильтрующего элемента состоит из подложки, «отсечного» слоя и фильтрующего слоя.

Каркас обеспечивает геометрическую целостность слоя фильтрующего материала, который в процессе фильтрации испытывает значительные нагрузки из-за разности гидравлических давлений жидкости на входе и выходе фильтрующего элемента. На поверхность каркаса наносится тонкий слой фильтрующего материала – подложка. Данный слой предотвращает миграцию волокон фильтрующего материала в отфильтрованную жидкость.

«Отсечной» слой обеспечивает необходимую тонкость фильтрации и отвечает за параметры эффективности фильтрующего элемента.

Последний слой фильтрующего материала несет на себе основную нагрузку по очистке жидкости. Он имеет наибольшую толщину, которая определяется наружным диаметром фильтрующего элемента. Размер пор плавно увеличивается от «отсечного» слоя до наружного (фильтрующего). Закон изменения размера пор зависит от гранулометрического состава твердых частиц в фильтруемой жидкости и должен выбираться из условия обеспечения максимальной грязеемкости фильтрующего элемента [4].

#### Проведение расчета параметров фильтрующего слоя

Критерием оптимальности структуры фильтрующего элемента является его максимальная грязеемкость при заданном гранулометрическом составе твердых частиц в фильтруемой жидкости [5].

За основу в разрабатываемой методике расчета параметров фильтрующего слоя взято положение о том, что для достижения максимальной грязеемкости в процессе фильтрации, частицы загрязнений должны равномерно заполнять поры фильтрующего материала. Для этого необходимо, чтобы объемы пор заданных размеров равнялись объемам твердых частиц соответствующих размеров.



Рис. 2. Лабораторный стенд контроля качества фильтров для жидких сред



Рис. 3. Счетчик частиц PAMAS S-4031 WG

Гранулометрический состав кварца молотого пылевидного

Размер частиц	Количество частиц заданного размера	Объем частиц заданного размера $V_i$	Относительный объем частиц заданного размера $\bar{V}_i$
мкм	шт.	м <sup>3</sup>	%
1,25	3248105	3,32E-12	1,51
1,75	1276588	3,58E-12	1,63
2,25	616211	3,68E-12	1,67
2,75	328673	3,58E-12	1,63
3,25	217495	3,91E-12	1,78
3,75	201102	5,55E-12	2,53
4,25	195107	7,84E-12	3,57
5,00	224536	1,47E-11	6,70
5,75	45278	4,51E-12	2,05
6,50	56418	8,11E-12	3,70
7,50	41463	9,16E-12	4,17
9,00	40831	1,56E-11	7,10
11,00	22150	1,54E-11	7,03
13,50	14319	1,84E-11	8,41
16,50	6525	1,53E-11	6,99
19,50	3282	1,27E-11	5,81
23,00	2162	1,38E-11	6,28
27,50	1194	1,30E-11	5,92
32,50	542	9,74E-12	4,44
37,50	262	7,23E-12	3,30
42,50	154	6,19E-12	2,82
47,50	78	4,38E-12	1,99
55,00	79	6,88E-12	3,14
65,00	36	5,18E-12	2,36
75,00	18	3,98E-12	1,81
85,00	7	2,25E-12	1,03
95,00	3	1,35E-12	0,61
		$\Sigma V_i = 2,19E-10$	100,00

Исходными данными для расчета параметров фильтрующего слоя являлись сведения о гранулометрическом составе твердых частиц в фильтруемой жидкости. В качестве загрязнителя использовался кварц молотый пылевидный марки Б ГОСТ 9077-82 [4].

Гранулометрический состав загрязнителя определялся на лабораторном стенде (рис. 2).

В емкость объемом 3 л набиралась чистая вода, добавлялся загрязнитель. Затем загрязненная вода подавалась на фильтрующий элемент и отбиралась проба воды до и после него с помощью пробоотборников.

Количество частиц загрязнителя в пробе воды определялось с помощью счетчика частиц (рис. 3).

Используя серию замеров, был определен гранулометрический состав загрязнителя; результаты представлены в табл. 1. В данной таблице представлены также результаты расчета объема частиц загрязнителя в предположении, что все они имеют сферическую форму. В последнем столбце таблицы приведены относительные объемы частиц по всем размерам, вычисленные по формуле

$$\bar{V}_i = \frac{V_i \cdot 100}{\sum V_i}, \quad (1)$$

где  $V_i$  – объем частиц заданного размера,  $\text{м}^3$ ;  $\sum V_i$  – суммарный объем частиц в принятом интервале размеров,  $\text{м}^3$ .

По относительному объему частиц заданного размера был выделен объем фильтрующего материала, пропорционально объему частиц и определены интервалы диаметров, обуславливающие положение данного объема фильтрующего материала в фильтрующем элементе.

Для вычислений использовалось поперечное сечение фильтрующего элемента (рис. 4), с указанием основных геометрических размеров.

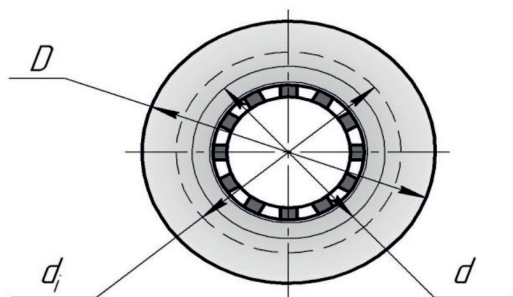


Рис. 4. Сечение фильтрующего элемента

Здесь  $d$  – внутренний диаметр, мм;  $D$  – наружный диаметр фильтрующего слоя, мм;  $d_i$  – размер, определяющий положение

рассматриваемого элемента фильтрующего материала, мм.

Для дальнейших расчетов использована система уравнений (2), в которой относительные объемы твердых частиц заменены на эквивалентные им значения площадей элементов поперечного сечения фильтрующего слоя.

$$\begin{cases} kS = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4}, \\ kS_i = \frac{\pi \cdot (d_i^2 - d_{i-1}^2)}{4}, \\ S = \sum S_i = 100. \end{cases} \quad (2)$$

Из первого уравнения системы получен коэффициент пропорциональности  $k$ . Он представлен в виде формулы

$$k = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4 \cdot S}. \quad (3)$$

Подставив формулу (3) во второе уравнение системы, получим выражение

$$\left[ \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4 \cdot S} \right] \cdot S_i = \frac{\pi \cdot (d_i^2 - d_{i-1}^2)}{4}. \quad (4)$$

Из формулы (4) были определены значения диаметров  $d_i$  по формуле (5):

$$d_i = \sqrt{4 \cdot S_i \cdot \left[ \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4 \cdot S} \right] + d_{i-1}^2}. \quad (5)$$

Толщина рассматриваемого фрагмента фильтрующего слоя определялась по формуле

$$\delta_i = \frac{d_i - d_{i-1}}{2}. \quad (6)$$

В результате проведенных вычислений была получена зависимость среднего размера пор фильтрующего материала от диаметра фильтрующего элемента (рис. 5).

При этом принимали в качестве допущения, что средний размер пор равен среднему размеру частиц.

Для изготовления фильтрующего элемента с заданным законом изменения размера пор по толщине фильтрующего слоя необходимо было получить связь между технологическими параметрами оборудования и параметрами фильтрующего слоя. Основным технологическим параметром, который определяет размер пор в фильтрующем материале, является давление воздуха на регуляторе. Для фильтрующего слоя таким параметром является удельное воздушное сопротивление воздушному потоку.

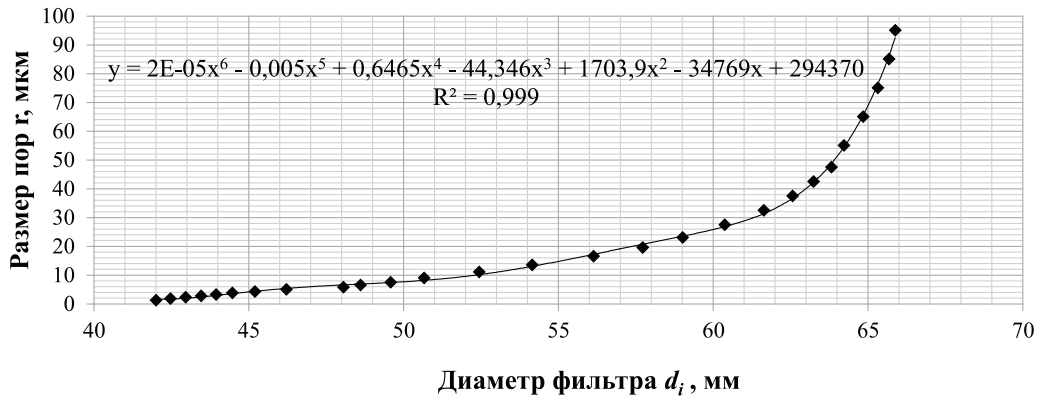
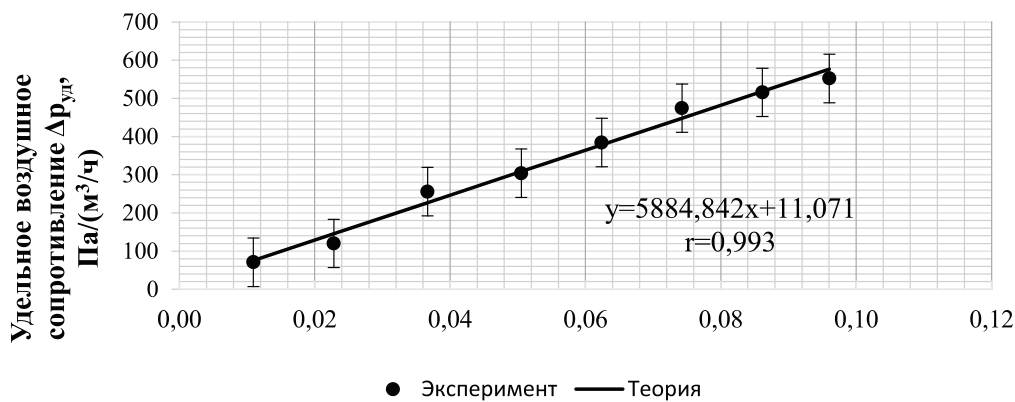


Рис. 5. График зависимости среднего размера пор  $r$  фильтрующего материала от диаметра  $d_i$



● Эксперимент — Теория  
Давление воздуха на регуляторе  $P_{рег}$ , МПа

Рис. 6. Экспериментальная и теоретическая зависимости удельного воздушного сопротивления фильтрующего слоя от давления воздуха на регуляторе

Для определения воздушного сопротивления элементов фильтрующего слоя использована зависимость (7), полученная для образцов «отсечного» слоя с номинальной толщиной фильтрации.

$$\Delta p_{отс}^{ном} = 727,7 \cdot \delta_{ном}^{-0,667}, \quad (7)$$

где  $\delta_{ном}$  – номинальная толщина фильтрации, мкм.

С учетом принятых обозначений удельное воздушное сопротивление элементов фильтрующего слоя, Па/(м<sup>3</sup>/ч), определялось по формуле

$$\Delta \bar{p}_i = \frac{727,2 \cdot \delta_{ном}^{-0,667} \cdot S_{отс}}{\delta_{отс}}, \quad (8)$$

где  $\delta_{отс}$  – толщина «отсечного» слоя, исходя из проведенных испытаний, равна  $\delta_{отс} = 3$  мм;  $S_{отс}$  – площадь фильтрующего материала на «отсечном» слое, м<sup>2</sup>, определялась по формуле

$$S_{отс} = \pi \cdot d \cdot l. \quad (9)$$

Для испытанных ранее нами образцов [4] и в данной работе длина «отсечного» слоя принималась равной  $l = 40$  мм, а диаметр  $d = 39$  мм.

Удельное воздушное сопротивление с учетом данных, представленных выше, было определено по формуле

$$\Delta \bar{p}_i = 1163,3 \cdot \delta_{ном}^{-0,667}. \quad (10)$$

Удельное сопротивление фильтрующего материала связано с давлением воздуха на регуляторе определенной зависимостью. В диапазоне давлений от 0,005 МПа до 0,1 МПа эту зависимость можно принять линейной.

На рис. 6 представлена полученная экспериментальная зависимость удельного воздушного сопротивления фильтрующего слоя от давления воздуха на регуляторе, подтверждающая возможность такого допущения. Также на нем представлена теоретическая зависимость данных параметров, полученная с помощью метода наименьших квадратов.

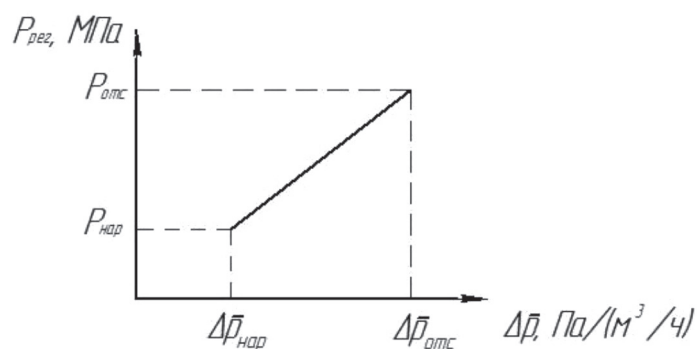


Рис. 7. Линейная зависимость давления воздуха на регуляторе от удельного сопротивления фильтрующего материала

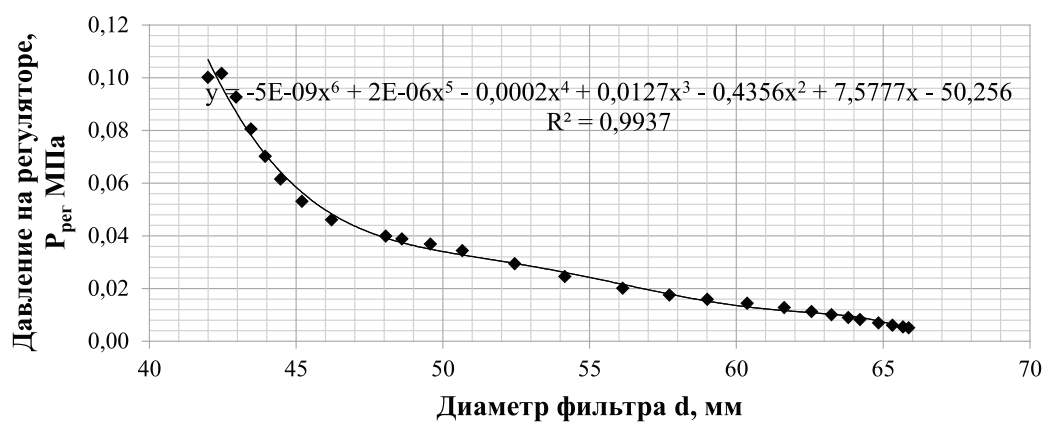


Рис. 8. График зависимости расчетного давления воздуха на регуляторе от диаметра фильтра

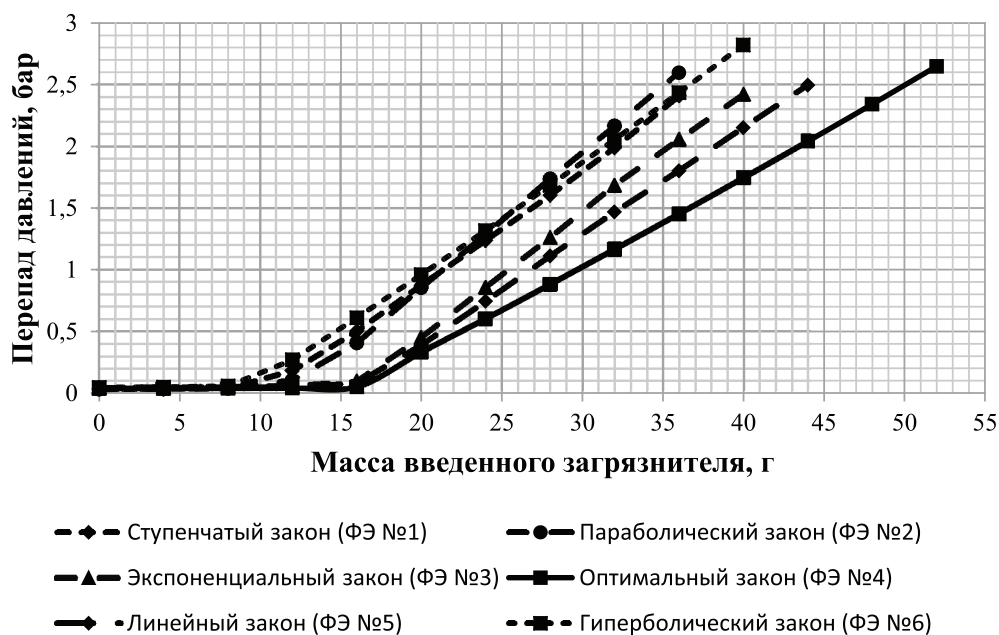


Рис. 9. Характеристики грядеемкости образцов с различными структурами

Задаваясь двумя точками  $(\Delta\bar{p}_{нар}; P_{нар})$  и  $(\Delta\bar{p}_{отс}; P_{отс})$  на рис. 7, получена зависимость для давления воздуха на регуляторе, описываемая формулой

$$P_{рег} = P_{нар} + \frac{P_{отс} - P_{нар}}{\Delta\bar{p}_{отс} - \Delta\bar{p}_{нар}} \cdot (\Delta\bar{p}_i - \Delta\bar{p}_{нар}). \quad (11)$$

Определив значения давления воздуха на регуляторе по формуле (11), получен искомый график зависимости расчетного давления воздуха на регуляторе  $P_{рег}$  от диаметра фильтра  $d_i$  (рис. 8).

Приведенная методика расчета позволяет определять структуру фильтрующего элемента с оптимальными характеристиками по эффективности и грязеемкости. Фильтрующий элемент, изготовленный по полученной зависимости, обладает наибольшей грязеемкостью.

#### Экспериментальное подтверждение приведенной методики

Для сравнительных испытаний на грязеемкость был проведен расчет структур нескольких фильтрующих элементов, у которых закон изменения давления на регуляторе отличался от оптимального. Использовались следующие законы изменения давления воздуха на регуляторе от диаметра фильтрующего элемента: ступенчатый, параболический, экспоненциальный, линейный, гиперболический. С помощью проведенных расчетов изготовили 6 партий фильтрующих элементов, в каждой из которых было по 5 образцов.

Результаты ресурсных испытаний, проведенных на гидравлическом стенде, представлены на рис. 9.

По сводному графику (рис. 9) видно, что фильтрующий элемент № 4, который был изготовлен нами на предприятии в соответствии с разработанной методикой расчета фильтрующего слоя, имеет наибольшую грязеемкость среди всех испытанных образцов.

В ходе анализа данных получили, что грязеемкость фильтрующего элемента увеличилась на 36% по сравнению с применяемым в настоящее время на производстве фильтроэлементом, сформированным по ступенчатому закону.

● В результате проведенного исследования получена зависимость удельного воздушного сопротивления фильтрующего материала от давления воздуха на регуляторе. Проведенные испытания позволили сделать вывод о том, что данную зависимость можно принять линейной.

Разработанная методика расчета параметров фильтрующих элементов в дальнейшем может быть использована при изготовлении фильтров с оптимальными характеристиками по грязеемкости, перепаду давлений и тонкости фильтрации для заданных условий эксплуатации.

#### Список литературы

1. Харитонов А.С., Селезнев В.А., Филенков В.М. Применение технологии мембранной очистки воды в качестве альтернативы классической технологии водоподготовки [Текст] // Вестник НГИЭИ. – 2014. – № 12 (43). – С. 103–107.
2. Хакимуллин Ю.Н., Вольфсон С.И., Галимзянова Р.Ю. Нетканые материалы на основе полимеров, используемые для производства медицинской одежды и белья, стерилизуемой радиационным излучением: виды материалов, технологии производства [Текст] // Развитие науки и образования в современном мире. – 2014. – В 7 частях. – Часть IV. – С. 97–103.
3. Кузнецов Л.К., Габитов А.И. Технология фильтрования в физико-химических процессах водоподготовки [Текст] // Башкирский химический журнал. – 2010. – № 2. – С. 84–92.
4. Христофорова М.И., Хролынцев А.А., Яковлева О.В. Поиск оптимальных параметров фильтрующего слоя для элементов из нетканого полимерного волокнистого материала [Текст] // Научные технологии. – 2016. – Т. 17, № 5. – С. 69–73.
5. Тумилович М.В. Пористые порошковые материалы и изделия на их основе для защиты здоровья человека и охраны окружающей среды: получение, свойства, применение [Текст] / М.В. Тумилович. – Минск: Белорусская наука, 2010. – 365 с.