

УДК 66.067.1:678.74

ВЛИЯНИЕ ХОЛОДНОГО КАЛАНДРИРОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛОКНИСТО-ПОРИСТЫХ СИСТЕМ «ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕН – ПОЛИПРОПИЛЕН»

В. Ю. ШУМСКАЯ¹, В. В. СНЕЖКОВ², А. Я. ГРИГОРЬЕВ¹

¹Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси», г. Гомель

²ОДО «Научно-технический центр ЛАРТА»,
г. Гомель, Республика Беларусь

На примере комбинации волокнисто-пористых материалов на основе полипропилена и политетрафторэтилена рассмотрено влияние степени холодного каландрирования на величину размера пор и фильтрационные характеристики. Описана конструкция лабораторной установки для исследования эффективности фильтрации смеси аэрозолей частиц воды и диоктилтерефталата.

Приведены данные по эффективности фильтрации, коэффициенту качества, насыщению, размеру пор, распределению пор по размерам, краевым углом смачивания. Установлено, что в интервале давления каландрирования от 2 до 10 кгс/см² обеспечивается оптимум функциональных характеристик исследованных фильтрационных материалов, соответствующий минимальному размеру пор и максимальной эффективности фильтрации в 99,90–99,97 %, при этом перепад давления не превышает 10 кПа.

Полученные результаты могут быть использованы для создания фильтров, в которых реализуются различные физические механизмы взаимодействия волокон с фильтруемыми газожидкостными потоками.

Ключевые слова: фильтрация, волокнисто-пористые материалы, полипропилен, политетрафторэтилен, каландрирование, газожидкостная порометрия, распределение пор по размерам, перепад давления, эффективность фильтрации.

EFFECT OF COLD CALENDERING ON STRUCTURE AND FILTRATION CHARACTERISTICS OF FIBROUS-POROUS POLYTETRAFLUOROETHYLENE – POLYPROPYLENE SYSTEMS

V. Y. SHUMSKAYA¹, V. V. SNEZHKOVA², A. Y. GRIGORIEV¹

¹The State Scientific Institution “V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus”, Gomel

²ODO “Scientific and Technical Center of LARTA”,
Gomel, the Republic of Belarus

On the example of a combination of fibrous-porous materials based on polypropylene and polytetrafluoroethylene, the influence of the degree of cold calendering on the pore size and filtration characteristics is considered. Described is a design of a laboratory plant for studying the filtration efficiency of a mixture of aerosols of water particles and dioctyl terephthalate.

Data on filtration efficiency, quality factor, saturation, pore size, pore size distribution, edge wetting angle are given. It was found that in the calendering pressure range from 2 to 10 kgf/cm², the optimum functional characteris-

tics of the examined filtration materials are provided, corresponding to the minimum pore size and maximum filtration efficiency of 99.90–99.97%, while the pressure drop does not exceed 10 kPa.

The obtained results can be used to create filters in which various physical mechanisms of interaction of fibers with filtered gas-liquid flows are realized.

Keywords: filtration, fibrous-porous materials, polypropylene, polytetrafluoroethylene, calendering, gas-liquid porometry, pore size distribution, pressure drop, filtration efficiency.

Введение

Задача фильтрации газовых потоков от жидких аэрозолей решается во многих отраслях промышленности, где качество очистки фильтруемых сред напрямую определяет технико-экономические показатели производств [1]. Прогресс в этой области постоянен и не только определяется возрастающими требованиями к качеству продукции, но и следует общемировой тенденции на ужесточение экологических нормативов по снижению загрязнений воздушной среды [2].

В настоящее время в фильтрах-коалесцерах нашли широкое применение полимерные волокнисто-пористые материалы (ВПМ), обладающие низким соотношением «цена/качество» и рядом технологических и конструкционных преимуществ перед традиционными решениями [3]. Перспективным и обоснованным представляется создание многослойных фильтроэлементов из полимерных волокнисто-пористых материалов с различными характеристиками смачиваемости жидкой средой, что позволяет учесть особенности механизмов коалесценции отделяемой жидкости на различных участках пористого пространства фильтра и за счет этого существенно повысить функциональность последнего. Так, в работе [4] было показано, что расположение двух слоев полимерных ВПМ в порядке увеличения их энергии межфазного взаимодействия с жидкостью, удаляемой из газа, значительно повышает эффективность фильтрации.

Известно, что на коалесценцию жидкой фазы в фильтре из ВПМ немаловажное влияние оказывает объемная структура и морфология пористого пространства. Эти параметры обычно считаются изотропными, однако очевидно, что их анизотропия по отношению к направлению фильтруемого потока влияет на качество и эффективность процессов коалесценции. Механические свойства полимерных ВПМ достаточно легко изменяют характеристики анизотропии поровой структуры материала (в частности, размер пор и объемную пористость) операцией холодного каландрирования. Управление соответствующими характеристиками имеет потенциал повышения функциональных свойств фильтроматериалов, однако на практике такая возможность изучена недостаточно.

Цель работы заключается в исследовании влияния холодного каландрирования слоистых полимерных ВПМ на размер пор и объемную пористость многослойного фильтрующего материала и на связь этих структурных параметров с фильтрационными характеристиками.

Материалы и методы исследований

Фильтроэлементы представляли собой двуслойные полотна. Одно из полотен изготавливалось по технологии пневмоэкструзии расплава полипропилена (Vorfloflow HL512FB, Vorealis (Австрия)), представляющего собой нетканый ВПМ, обладающий поверхностной плотностью 120 г/м² (далее – «МБ») [5]. Другое полотно получали методом лазерной абляции политетрафторэтилена в вакууме – материал «Грифтекс», обладающий поверхностной плотностью 230 г/м² (далее – «Гр») [6].

Двуслойные полотна составов «МБ + Гр» и «Гр + МБ», отличающиеся расположением указанных слоев ВПМ по отношению к фильтруемому газовому потоку, были подвергнуты каландрированию при различном давлении на лабораторном гидравлическом прессе Carver (США) при комнатной температуре. После изготовления образцы 24 ч выдерживали при комнатной температуре.

Характеристики изготовленных образцов приведены в табл. 1, морфология торцов фильтроматериалов при давлении прессования – 0 и 15 кгс/см², представленная на рис. 1, изучалась на растровом электронном микроскопе VegaII LSH (Tescan, Чехия).

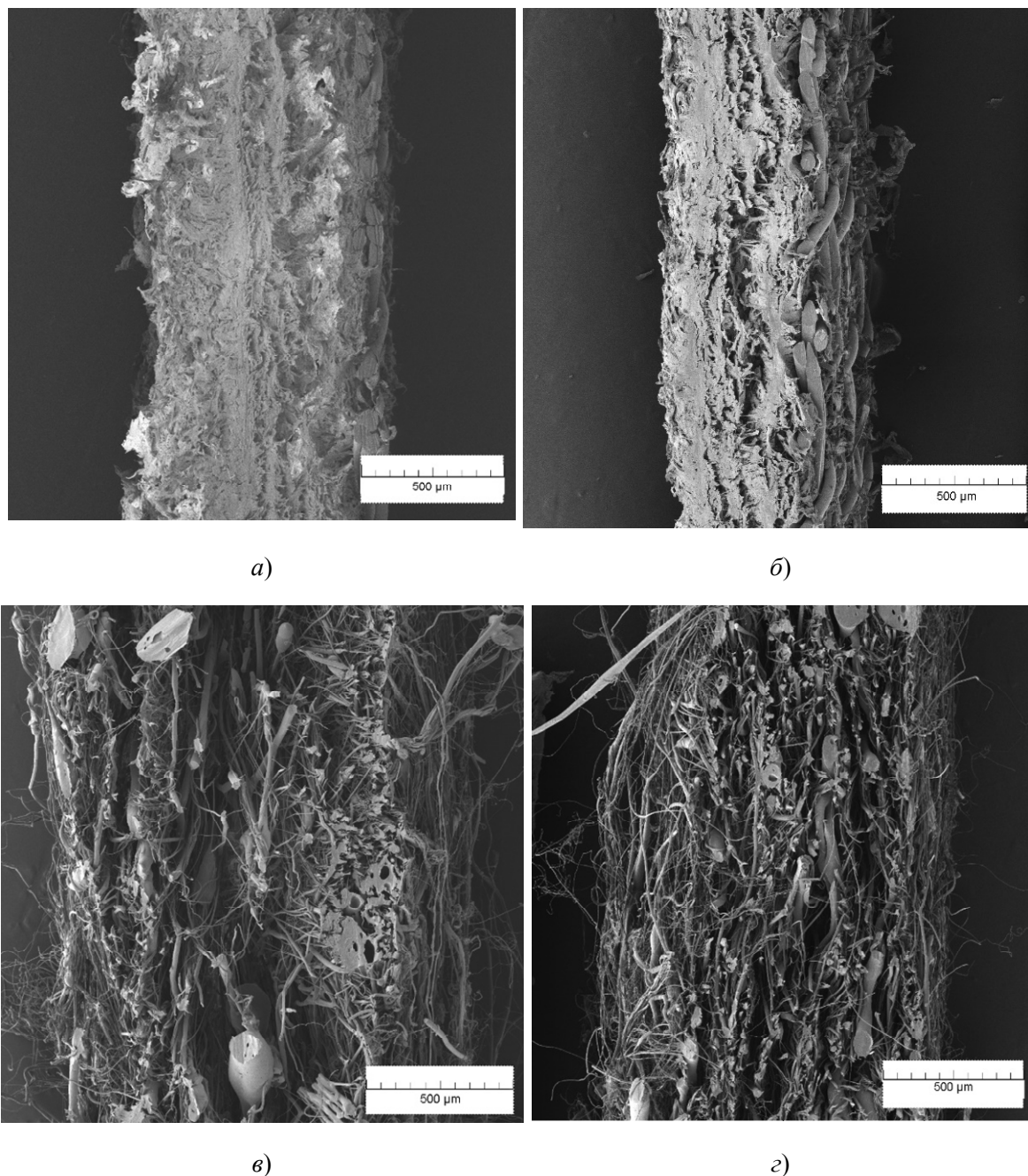


Рис. 1. Морфология полимерных фильтроматериалов с давлением прессования – 0 и 15 кгс/см² соответственно:
а, б – материал «Гр», в, з – материал «МБ»

Таблица 1

Характеристики исследованных волокнисто-пористых материалов

Давление прессования P , кгс/см ²	0	2	6	10	15
Размеры образца (длина × ширина), мм	165,0 × 35				166,5 × 36
Толщина композитного полотна, мм	2,5	2,0	1,65	1,3	1,25
Площадь, см ²	57,75				60,12

Полотна размером 165 × 35мм размещались на дренажном слое из волокнисто-пористого полипропилена (ФВП) марки 21003 (ГОСТ 26996–86). Боковые поверхности полученных образцов уплотнялись силиконовым герметиком и устанавливались в кассету (рис. 2, а) испытательного стенда (рис. 2, б).

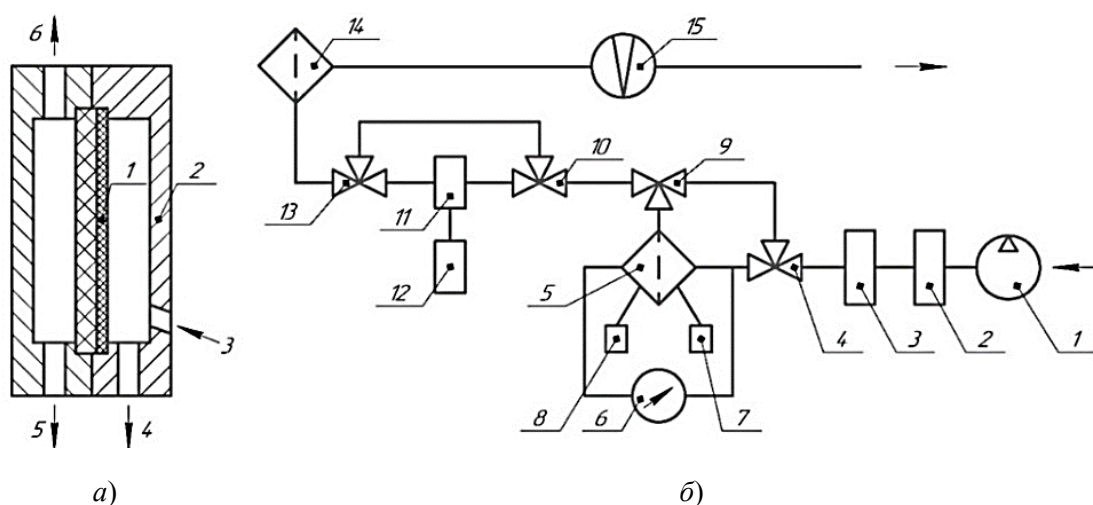


Рис. 2. Установка для испытаний фильтрационных материалов:

а – кассета фильтра: 1 – испытуемый образец (ориентация образца отношению к потоку); 2 – корпус фильтра; 3, 6 – входное и выходное отверстия; 4, 5 – дренажные отверстия; б – схема установки (обозначения в тексте)

Фильтрации подвергали полидисперсную смесь частиц воды и диоктилтерефталата (ДОТФ), моделирующие аэрозоли природного скважинного газа.

В ходе испытаний атмосферный воздух, нагнетаемый компрессором, подавали на атомайзер 2, генерирующий аэрозоль ДОТФ, поступающий в емкость с ультразвуковым генератором водяного тумана 3. Коммутацией вентилей 4, 9, 10, 13 воздушно-капельный поток, состоящий из смеси аэрозоля воды и ДОТФ, направляли либо на кассету с исследуемым образцом ВПМ 5, либо на байпасную линию, служащую для калибровки характеристик аэрозольного потока. Падение давления на образце ВПМ 5 измеряли дифференциальным манометром 6. Емкости 7 и 8 служили для сбора и измерения объема жидкости, отделенной со стороны входа и выхода воздушного потока в ВПМ. Размер и количество аэрозольных частиц, прошедших через фильтр или байпасную линию, регистрировали с частотой 1 Гц лазерным счетчиком 11 по шести каналам (0,3–10 мкм) и передавали для обработки на компьютер 12. Контрольный фильтр 14 служил для оценки массового количества жидкости, прошедшей через ВПМ за время испытаний.

На основании полученных на установке экспериментальных значений количества частиц водного аэрозоля в воздушном потоке до и после фильтра расчетным ме-

тодом оценивали эффективность фильтрации E и коэффициент качества QF [7]. Эффективность фильтрации определяли по формуле

$$E = \frac{C_{\text{вх}} - C_{\text{вых}}}{C_{\text{вх}}},$$

где концентрации на входе $C_{\text{вх}}$ и выходе $C_{\text{вых}}$ рассчитывают как сумму концентраций для каждого канала регистрации по формуле

$$C = \sum N_i \frac{\rho}{6} d_i^3 c_{\text{ж}},$$

где C – общая массовая концентрация; N_i – количество капель диаметром d_i ; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости принята $0,995 \text{ г/см}^3$, исходя из соотношения плотности воды и ДОТФ, составляющего около $10 : 1$.

Коэффициент качества фильтрации, характеризующий долю задержанной на фильтре жидкости, приходящуюся на единицу перепада давления, определяли по формуле

$$QF = \frac{-\ln(C_{\text{вых}} - C_{\text{вх}})}{\Delta P},$$

где ΔP – перепад давления на фильтре. Чем больше величина QF , тем выше производительность фильтра и качество отделения жидкости из газа. Параметр не имеет верхних и нижних границ, поэтому может быть использован только для сравнения свойств материалов при одинаковых условиях испытаний.

Насыщение жидкостью фильтрующей среды, влияющее на перепад давления в фильтре и локальную скорость газа в его среде, рассчитывали по формуле

$$S = \frac{m_{\text{ж}}/c_{\text{ж}}}{V_{\text{пор}}},$$

где $m_{\text{ж}}$ – масса жидкости, удержанной образцом, г; $V_{\text{пор}}$ – объемная доля пор, м^3 , определяемая в соответствии с выражением:

$$V_{\text{пор}} = V_{\text{ф.м}} - \frac{m_{\text{ф.м}}}{\rho},$$

где $V_{\text{ф.м}}$ – объем фильтрующего материала, м^3 ; $m_{\text{ф.м}}$ – масса фильтрующего материала, г; ρ – плотность волокон, г/м^3 .

Определение распределения пор по размерам проводили методом газожидкостной порометрии на приборе POROLUX500 (Германия) [8]. Принцип работы основан на вытеснении смачивающей жидкости из пор образца посредством воздействия сжатого газа. Когда давление газа становится выше поверхностного натяжения жидкости в самой крупной поре, жидкость выталкивается из поры. Последующее повышение давления позволит пройти газу сквозь меньшие поры – так происходит до тех пор, пока все поры не освободятся. Контролируя давление газа, приложенное к образцу, и поток газа, проходящего сквозь образец во время вытекания жидкости из поры, определяют так называемую «мокрую кривую». Если образец во время испытания не смочен – соответственно «сухую кривую». Сравнивая полученные данные

при «сухом» и «мокрым» тестах, рассчитывают распределение пор по размерам, а также средний и максимальный размер пор (первой точки пузырька). В качестве смачивающей жидкости использовали состав «Porefil» с поверхностным натяжением 16 дин/см.

Измерение краевых углов смачивания производили с помощью программно-аппаратного комплекса на базе контактного углового гониометра «Капля-5» [9]. Эксперимент осуществляли в ручном режиме с помощью программы ImageView. В качестве тестирующих сред применяли следующие жидкости: дистиллированная вода (поверхностное натяжение – 72,8 мДж/м²), глицерин (поверхностное натяжение – 63,4 мДж/м²), масло марки ТП-22 (поверхностное натяжение – 26,7 мДж/м²).

Результаты и их обсуждение

Известно, что размер пор и поровая структура в целом является одной из важных характеристик волокнистых фильтроматериалов [10], влияющей на такие функциональные свойства, как перепад давления, тонкость фильтрации, эффективность фильтрации, грязеемкость, эффективность коалесценции, дренаж и т. п. Результаты определения размера пор в точке пузырька d_n , размера пор при усредненном потоке d_{cp} и минимального размера пор $d_{мин}$ при различных режимах прессования приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения размеров пор композиционной волокнисто-пористой системы «МБ – Гр» при различных режимах прессования и сторонах подачи сжатого газа

$P,$ кгс/см ²	0		2		6		10		15	
	«МБ/ Гр»	«Гр/ МБ»	«МБ/ Гр»	«Гр/ МБ»	«МБ/ Гр»	«Гр/ МБ»	«МБ/ Гр»	«Гр/ МБ»	«МБ/ Гр»	«Гр/ МБ»
$d_n,$ мкм	34,87	21,27	25,54	25,47	17,01	17,02	17,03	14,19	21,25	14,19
$d_{cp},$ мкм	8,13	5,91	6,37	6,47	4,99	3,44	2,92	1,83	4,06	2,27
$d_{мин},$ мкм	1,64	1,69	1,4	1,94	1,16	0,87	0,65	0,65	0,87	0,63

В качестве подтверждения уменьшения размера пор полимерных фильтроматериалов в зависимости от давления прессования интерес представляет изучение морфологии материала с помощью электронной микроскопии. Поскольку исследуемые материалы имеют очень развитые поверхности, определение их структуры вызывает определенные трудности. Поэтому в качестве оценки исследовались материалы с давлением прессования – 0 и 15 кгс/см². Морфология материалов, приведенных на рис. 1, иллюстрирует значительное уменьшение толщины и плотности упаковки образца. Очевидно, что данные показатели влияют на распределение пор по размерам.

На рис. 3 представлены графики дифференциального потока [CDIF], характеризующего распределение пор по размерам. Из полученных данных следует, что обработка каландрированием при давлениях от 2 до 10 кгс/см² (1,0 МПа) уменьшает размеры пор. При этом измеренный средний размер пор при входе потока со стороны слоя материала «Гр» меньше, чем при входе потока со стороны «МБ», что обусловлено различным характером взаимодействия жидкости с волокнами. Это подтверждает ранее сделанный вывод о влиянии порядка расположения ВПМ с разной энергией межфазного взаимодействия в композиционном составном фильтроэлементе [4].

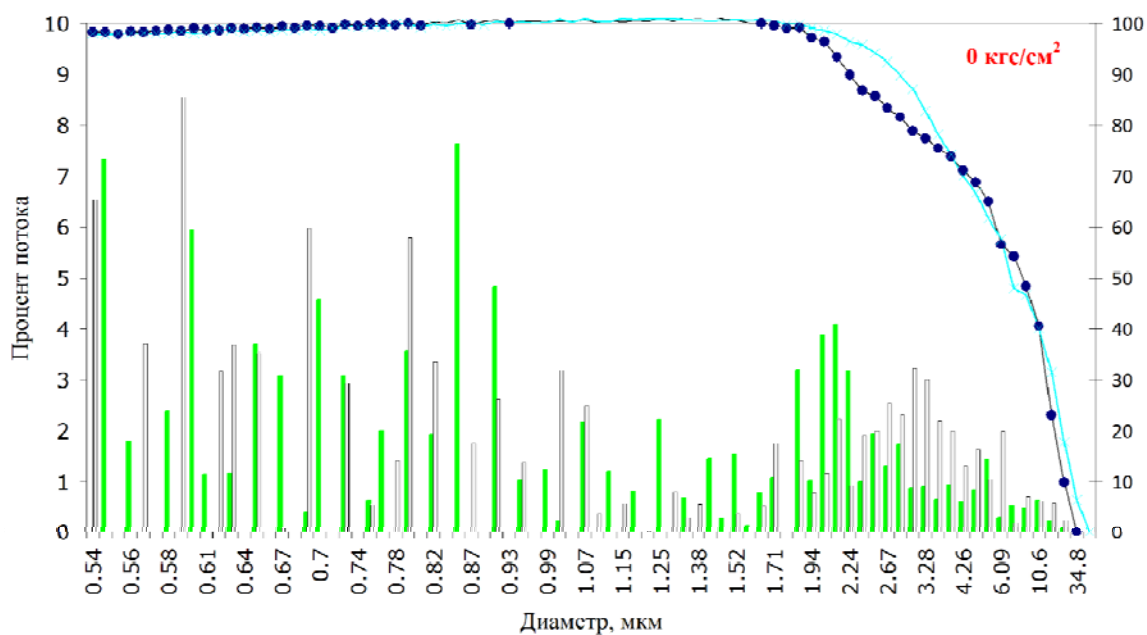


Рис. 3а. Газожидкостная параметрия волокнисто-пористых материалов с давлением каландрирования 0 кг/см²:

■ – распределение пор по размерам «МБ/Гр» (CDIF);
 ● – кумулятивный поток «МБ/Гр» (SUM); □ – распределение пор по размерам «Гр/МБ» (CDIF); ● – кумулятивный поток «Гр/МБ» (SUM)

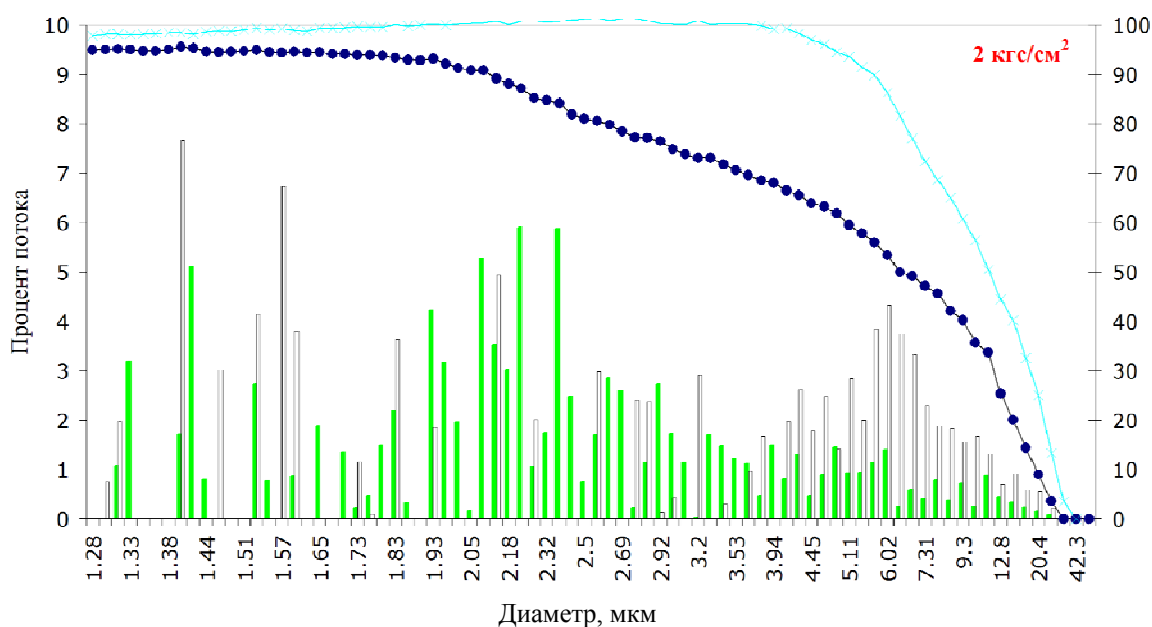


Рис. 3б. Газожидкостная параметрия волокнисто-пористых материалов с давлением каландрирования 2 кг/см²:

■ – распределение пор по размерам «МБ/Гр» (CDIF);
 ● – кумулятивный поток «МБ/Гр» (SUM); □ – распределение пор по размерам «Гр/МБ» (CDIF); ● – кумулятивный поток «Гр/МБ» (SUM)

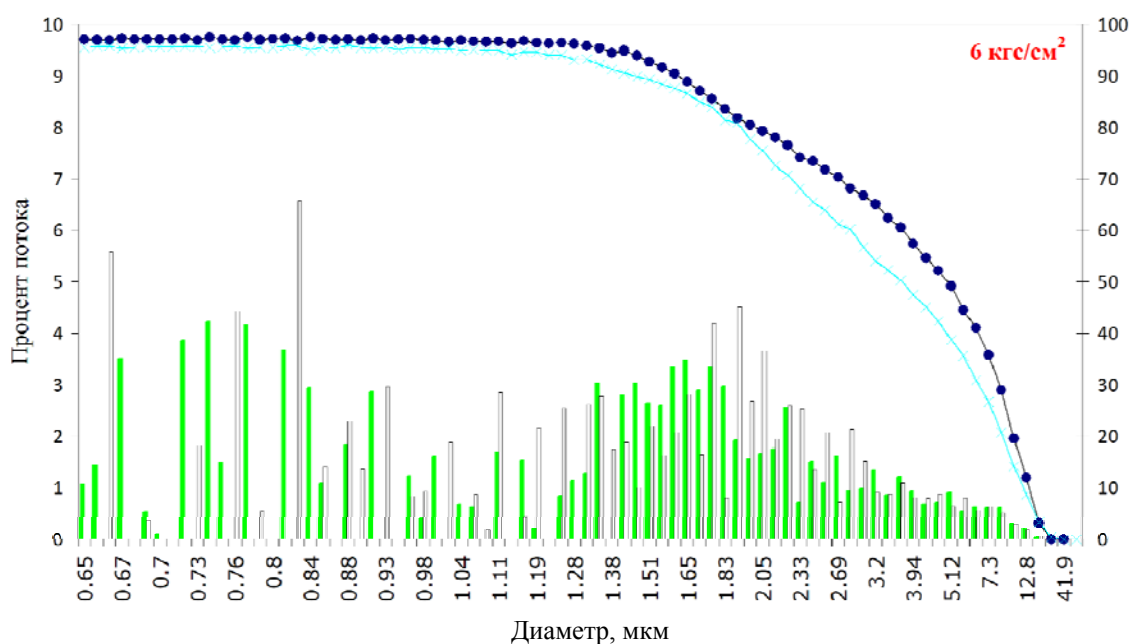


Рис. 3в. Газожидкостная параметрия волокнисто-пористых материалов с давлением каландрирования 6 кгс/см²:

■ – распределение пор по размерам «МБ/Гр» (CDIF);
 ● – кумулятивный поток «МБ/Гр» (SUM); □ – распределение пор по размерам «Гр/МБ» (CDIF);
 ✕ – кумулятивный поток «Гр/МБ» (SUM)

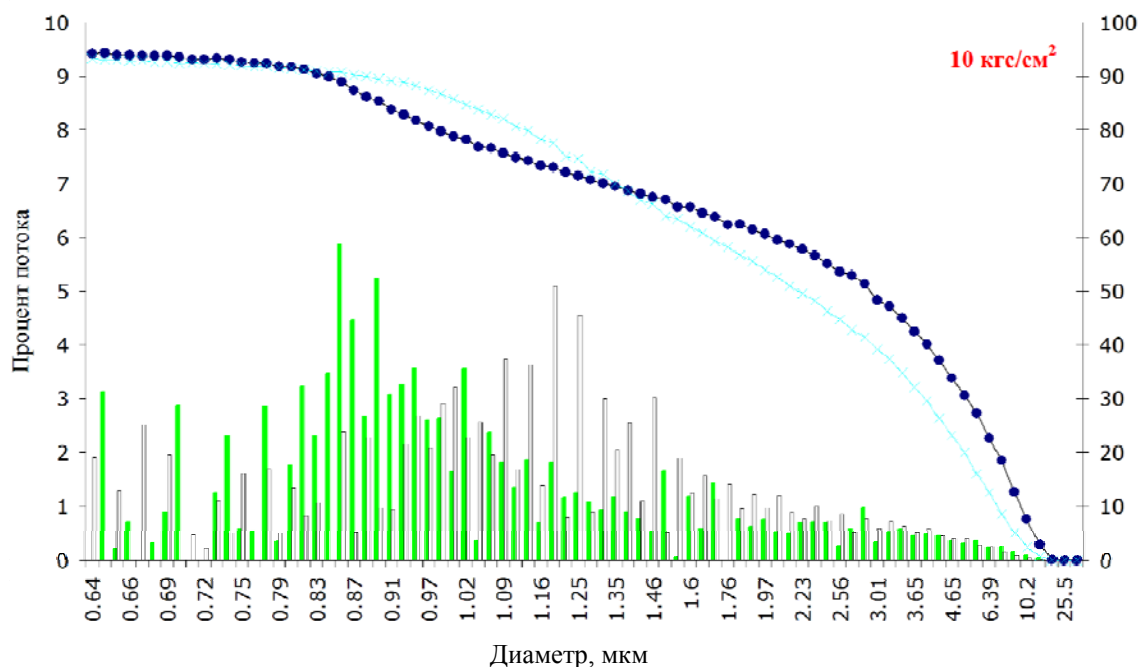


Рис. 3г. Газожидкостная параметрия волокнисто-пористых материалов с давлением каландрирования 10 кгс/см²:

■ – распределение пор по размерам «МБ/Гр» (CDIF);
 ● – кумулятивный поток «МБ/Гр» (SUM); □ – распределение пор по размерам «Гр/МБ» (CDIF);
 ✕ – кумулятивный поток «Гр/МБ» (SUM)

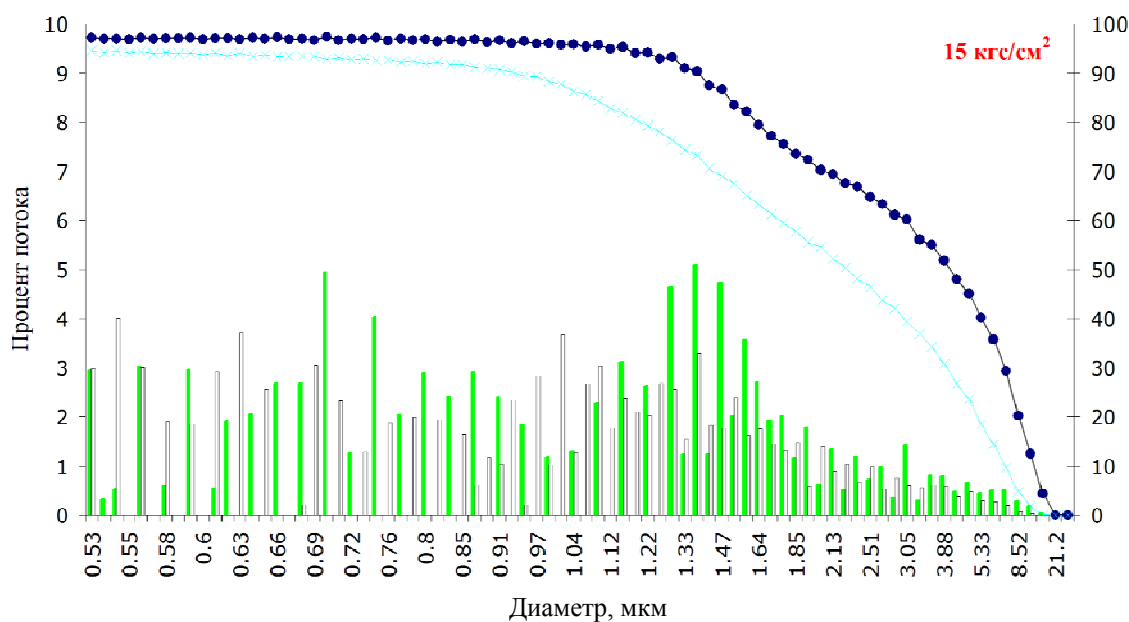


Рис. 3д. Газожидкостная параметрия волокнисто-пористых материалов с давлением каландрирования 15 кгс/см^2 :
■ – распределение пор по размерам «МБ/Гр» (CDIF);
● – кумулятивный поток «МБ/Гр» (SUM); – распределение пор по размерам «Гр/МБ» (CDIF); —x— – кумулятивный поток «Гр/МБ» (SUM)

Из зависимости, представленной на рис. 4, следует, что при увеличении давления каландрования до 10 кгс/см^2 размер всех пор уменьшается, а при увеличении давления до 15 кгс/см^2 наблюдается некоторое увеличение размера пор, причем в большей степени – крупных и средних по размерам.

Наиболее вероятной причиной этого может быть изменение геометрической ориентации волокон со сдвигом их преимущественного расположения в плоскости, перпендикулярной приложенному усилию каландрирования. Свидетельством этого является изменение линейных размеров образцов.

Так, линейные размеры образцов, обработанных при давлении 2, 6 и 10 кгс/см^2 , не изменились, а у образца, отпрессованного давлением 15 кгс/см^2 , увеличились в среднем на 2–3 %.

Как результат, передвижение волокон в плоскости образца при каландровании привело к увеличению расстояния между волокнами и, соответственно, к некоторому увеличению размера пор.

Полученные данные свидетельствуют, что у материала, обработанного при давлении 2 кгс/см^2 , размер пор, измеренный при входе потока со стороны «Гр», больше, чем у исходного.

Наиболее вероятной причиной этого может быть эффект спровоцированного каландрованием изменения параметров осуществляемого на микронном масштабном уровне межфазного взаимодействия между контактирующими поверхностями «МБ» и «Гр».

Результатом является разнонаправленный сдвиг волокон с по-разному происходящим проникновением их в поры как собственного материала, так и соседнего ВПМ.

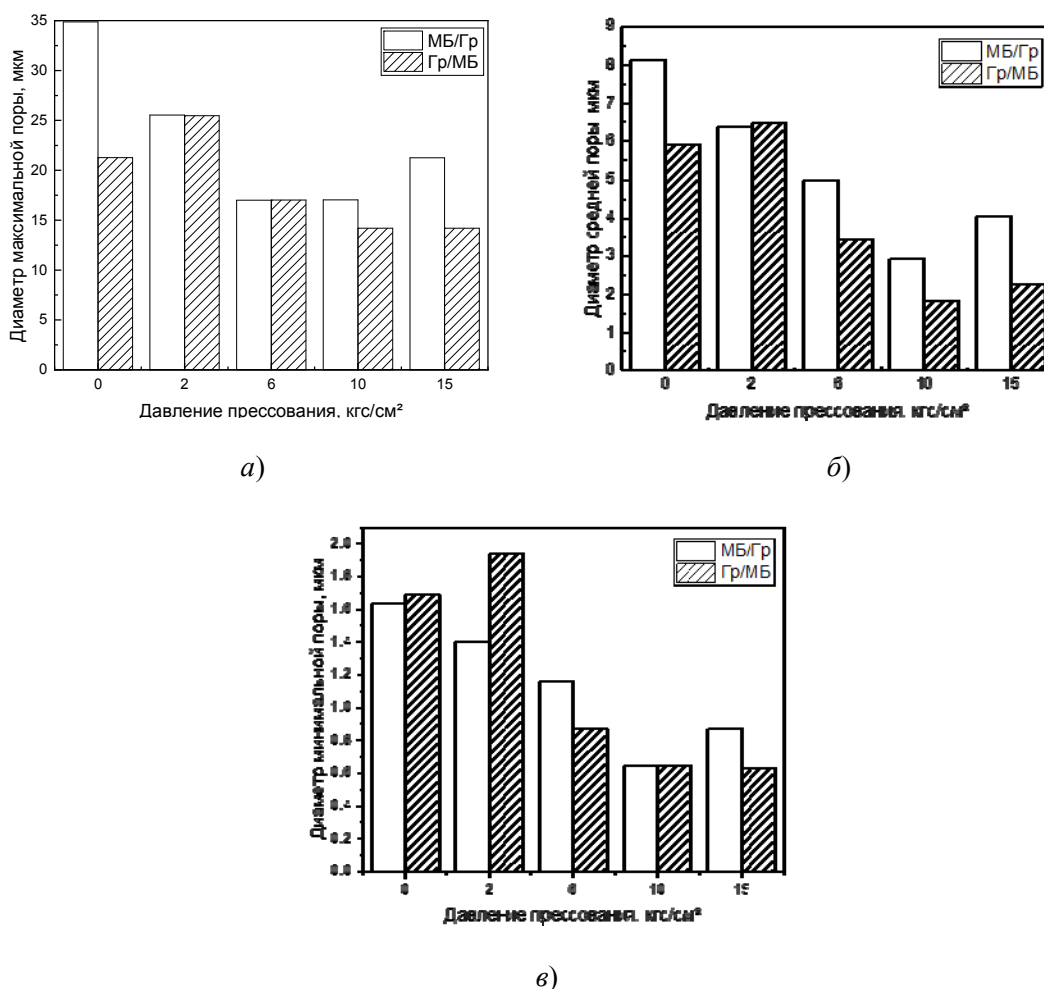


Рис. 4. Зависимость изменения размера максимальных (а), средних (б) и минимальных (в) пор от давления прессования

Таблица 3

Размер пор волокнисто-пористых материалов

P, кгс/см ²	0		2		6		10		15	
	«Гр/МБ»	«МБ/Гр»	«Гр/МБ»	«МБ/Гр»	«Гр/МБ»	«МБ/Гр»	«Гр/МБ»	«МБ/Гр»	«Гр/МБ»	«МБ/Гр»
Размер пор при CF 20 %	14,0	15,3	19,6	14,7	6,9	7,1	4,3	6,5	5,1	7,2

Данные табл. 3 свидетельствуют, что при увеличении давления прессования до 10 кгс/см² сдвигается в меньшую сторону точка CF 20 %, определяющая верхний предел распределения размера пор, через которые проходит 80 % суммарного потока, а 20 % проходит через поры большего размера. При давлении 15 кгс/см² наблюдается смещение данной точки в сторону большего размера пор по отношению к образцу, полученному при давлении 10 кгс/см², что, очевидно, вызвано увеличением размера пор. А при давлении 2 кгс/см² точка CF 20 % при направлении потока со стороны «Гр» смещается в сторону большего размера (19,6 мкм) пор по сравнению с потоком в обратном направлении (14,7 мкм).

Одной из основных характеристик фильтров является эффективность фильтрации. В табл. 4 приведены значения эффективности фильтрации для каландрированных материалов, полученных при разных давлениях прессования. По массовой концентрации жидкости для всех образцов эта величина возрастает с увеличением давления прессования. Необходимо отметить, что эффективность фильтрации у одного и того же материала отличается при изменении направления потока. Так, при потоке в направлении «Гр/МБ» эффективность фильтрации возрастает при давлении прессования до 6 кгс/см^2 и затем снижается, тогда как для потока «МБ/Гр» возрастает до давления 15 кгс/см^2 . Таким образом, все образцы материала, полученные при давлении $2\text{--}15 \text{ кгс/см}^2$, обеспечивают эффективность отделения жидкости из воздушного потока более 99 %.

Таблица 4

Значение эффективности фильтрации, %

$P, \text{ кгс/см}^2$	«Гр/МБ»	«МБ/Гр»
0	98,68	91,46
2	99,93	98,72
6	99,98	99,90
10	99,97	99,97
15	99,96	99,99

Важным параметром, определяющим эффективность работы фильтра, является перепад давления на нем. Результаты изменения этой характеристики во времени приведены на рис. 5.

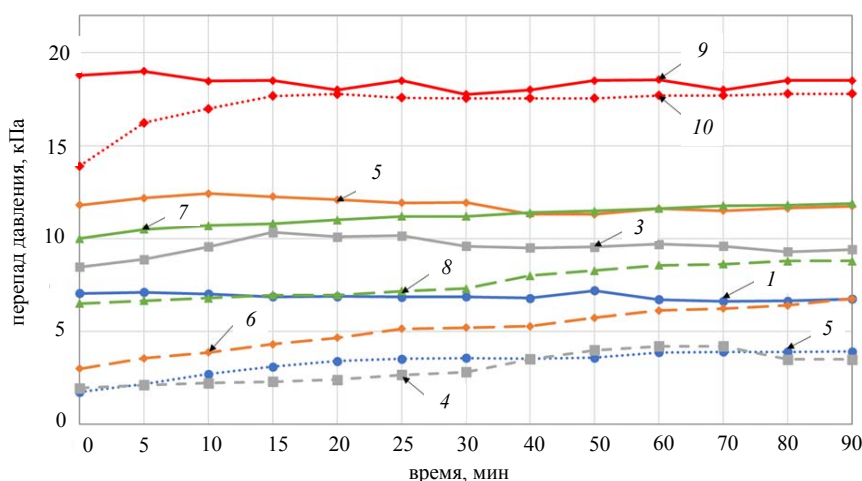


Рис. 5. Зависимость перепада давления от времени для комбинаций волоконисто-пористых материалов, подпрессованных при усилии $0, 2, 6, 10, 15 \text{ кгс/см}^2$ соответственно: 1, 3, 5, 7, 9 – «Гр/МБ»; 2, 4, 6, 8, 10 – «МБ/Гр»

Из приведенных зависимостей видно, что для направления «МБ/Гр» перепад давления постепенно возрастает и стабилизируется, причем по мере увеличения давления прессования время роста перепада давления уменьшается. В то же время в направлении «Гр/МБ» рост перепада незначителен и происходит в короткий промежуток времени на начальном этапе фильтрации.

На рис. 6 приведены зависимости изменения перепада давления и коэффициент качества, который учитывает эффективность фильтрации и перепад давления. Как следует из рис. 6, перепад давления возрастает при увеличении давления прессования для всех образцов. Наиболее существенный рост наблюдается при увеличении давления прессования более 10 кгс/см². Вместе с тем при направлении потока в направлении «МБ/Гр» перепад давления оказывается ниже, чем при «Гр/МБ», хотя эта разница уменьшается с увеличением давления прессования.

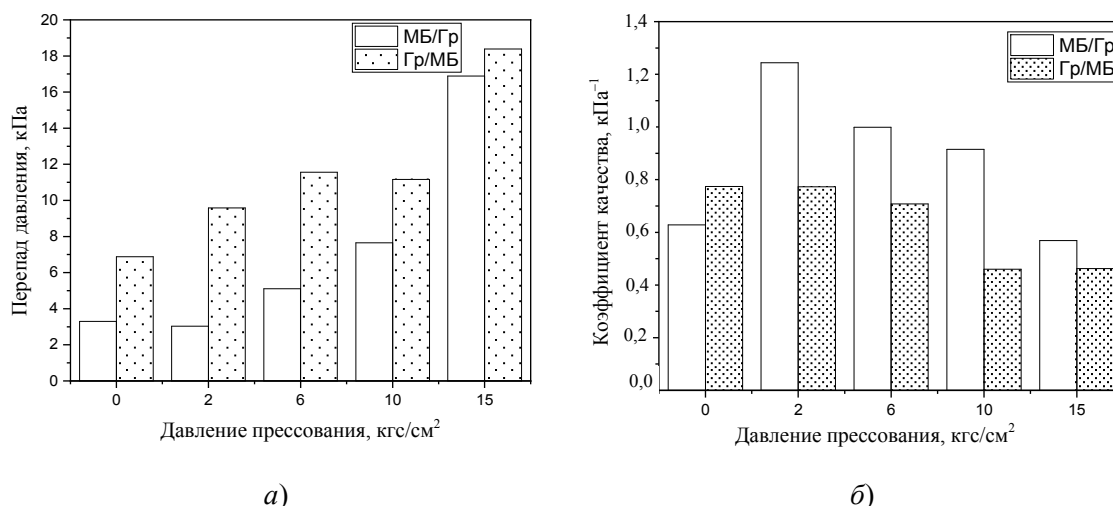


Рис. 6. Зависимость перепада давления (а) коэффициента качества (б) от давления прессования

На зависимости коэффициента качества наблюдается максимум при давлении 2 кгс/см² для направления потока «МБ/Гр». Таким образом, анализ данных зависимостей позволяет определить значения давления прессования, позволяющие получить фильтрующий материал с оптимальными фильтрующими характеристиками.

Одной из важнейших характеристик фильтров-коалесцеров является их насыщенность жидкостью [11–12]. Она определяется как соотношение объема жидкости, удерживаемой в материале, к общему объему пор. Рассчитанные значения насыщенности материалов приведены на рис. 7. Характерно, что насыщенность образцов, испытанных при направлении потока «МБ/Гр», значительно ниже, чем у «Гр/МБ».

Известно, что способность фильтрующего материала насыщаться отфильтровываемым компонентом существенно влияет на его смачиваемость и в результате – на долговременную работоспособность [13]. Смачиваемость определяется как адгезионное взаимодействие, которое происходит на поверхности раздела фаз, обуславливается свойствами поверхности твердого тела и свойствами смачивающей жидкости и определяется краевым углом смачивания. Измеренные значения краевого угла смачивания приведены в табл. 5.

Таблица 5

Краевой угол смачивания

Образец	Угол смачивания, град		
	Вода	Глицерин	Масло
«МБ»	113,6	129,1	Растекается
«Гр»	141,5	126,9	136,4

Полученные данные свидетельствуют о том, что ВПМ «Гр» является гидрофобным и олеофобным с низкой поверхностной энергией, а ВПМ «МБ» – гидрофобным, с низкой поверхностной энергией по отношению к воде и глицерину, и олеофильным, с высокой поверхностной энергией по отношению к маслу.

Следует отметить, что при направлении потока в сторону «Гр/МБ» насыщенность начинает снижаться при увеличении давления более 10 кгс/см^2 , что может быть вызвано взаимопроникновением слоев волокон «МБ» и «Гр» на границе раздела соответствующих ВПМ. Это ведет к размытию выраженных межфазных границ на макроуровне, сохраняя эту тенденцию на микроуровне и определяя многоуровневый, многоступенчатый и многофункциональный характер захвата загрязнений из фильтруемых газожидкостных потоков с помощью комбинированных ВПМ.

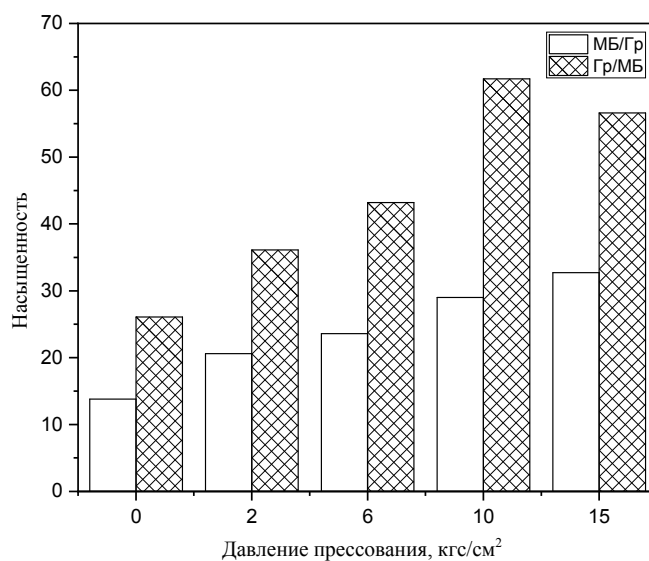


Рис. 7. Зависимость насыщенности от степени прессования

Увеличение насыщенности приводит к уменьшению свободного объема пор, а данный эффект влечет за собой увеличение скорости движения капель в материале, вследствие чего происходит проскок мелких капель и их вторичный унос потоком. Это наблюдается в ВПМ, полученном при давлении 10 и 15 кгс/см^2 (рис. 8), где представлено распределение капель по размерам, во входном и выходном потоках для всех исследованных образцов.

Представленные данные характеризуют распределение капель по размерам в отфильтрованном потоке для комбинированных ВПМ, испытанных при разном направлении потока.

Характер распределения одинаков для всех образцов, за исключением двух образцов (0 и 2 кгс/см^2), испытанных в направлении «МБ/Гр».

Для исходного образца наблюдается увеличение количества мелких капель ($0,3\text{--}3 \text{ мкм}$) по сравнению с их содержанием во входном потоке, а для образца, полученного при 2 кгс/см^2 , заметно увеличение проникших капель размером $0,3\text{--}1,5 \text{ мкм}$, что обусловлено перестройкой поровой структуры и характером изменения размера пор, показанном на рис. 4.

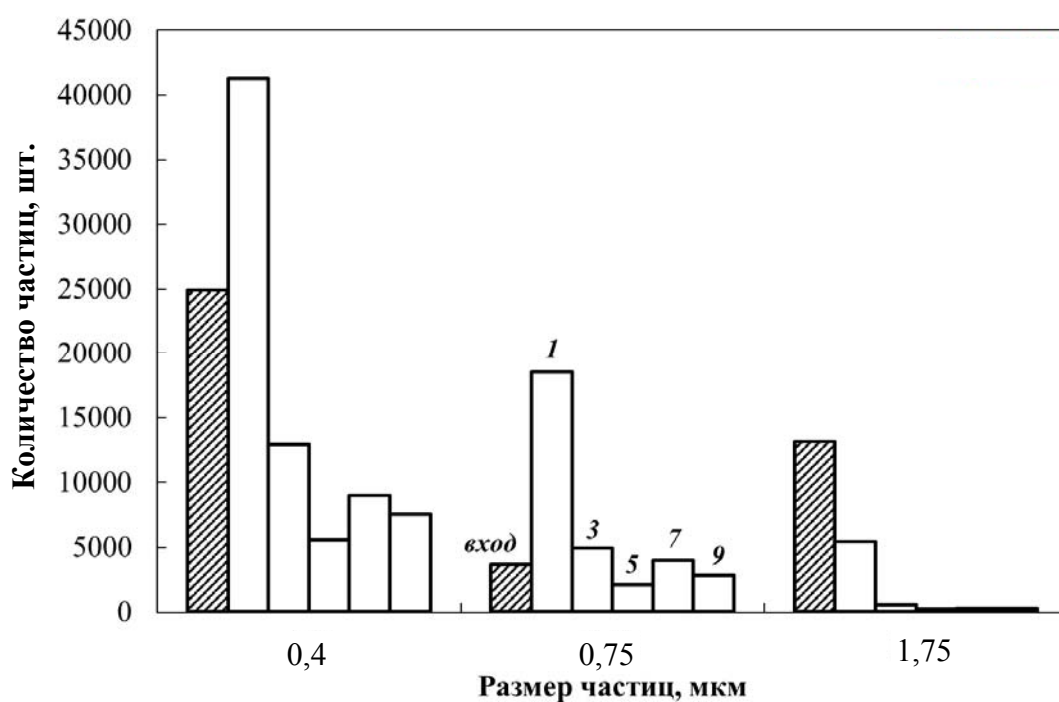


Рис. 8а. Распределение частиц по размерам (0,4; 0,75; 1,75 мкм) во входном и выходном потоках для комбинации «Гр/МБ» с давлением каландрирования: 1, 3, 5, 7, 9 – 0, 2, 6, 10, 15 кгс/см²

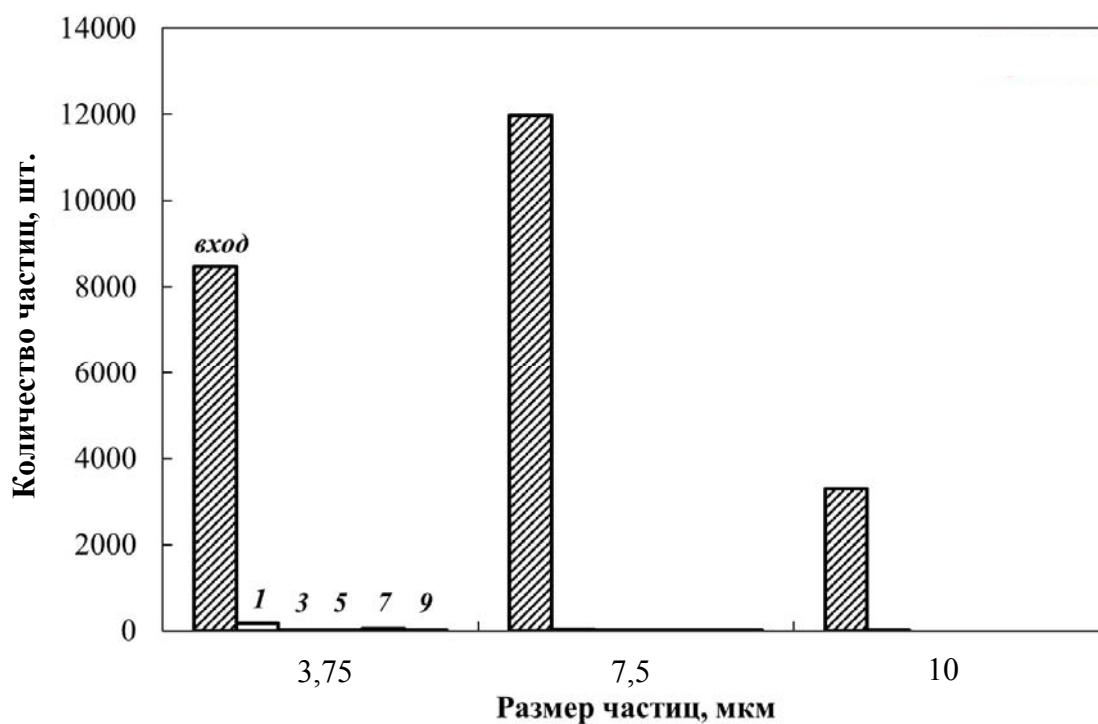


Рис. 8б. Распределение частиц по размерам (3,75; 7,5; 10 мкм) во входном и выходном потоках для комбинации «Гр/МБ» с давлением каландрирования: 1, 3, 5, 7, 9 – 0, 2, 6, 10, 15 кгс/см²

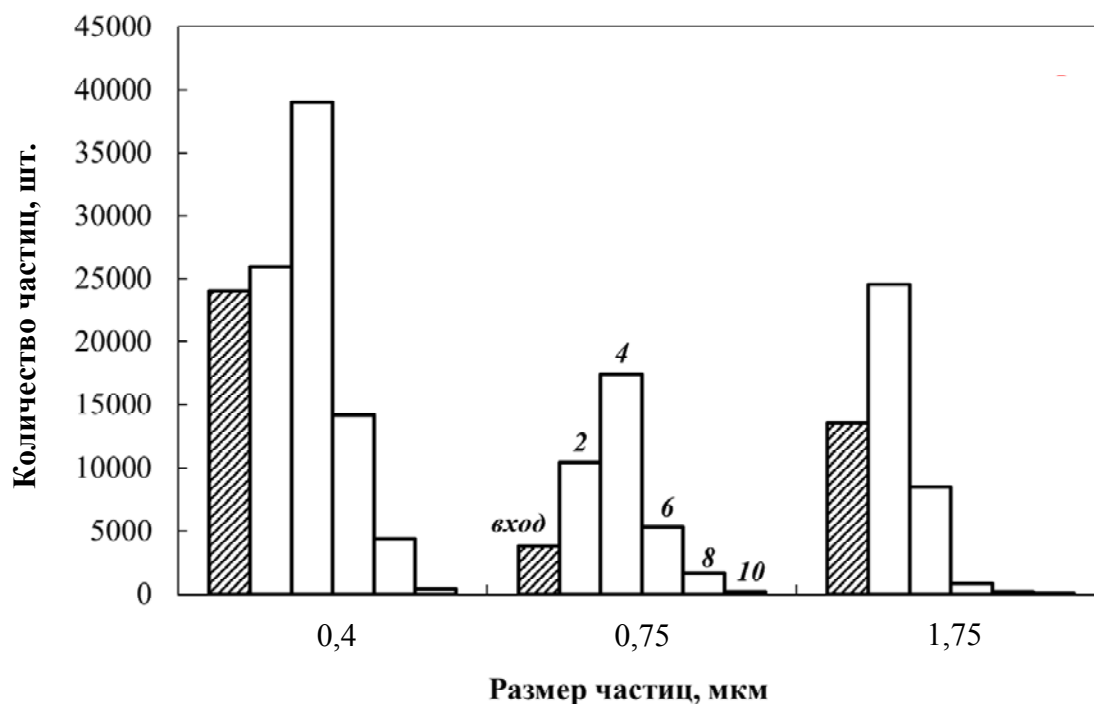


Рис. 8в. Распределение частиц по размерам (0,4; 0,75; 1,75 мкм) во входном и выходном потоках для комбинации «МБ/Гр» с давлением каландрирования: 2, 4, 6, 8, 10 – 0, 2, 6, 10, 15 кгс/см²

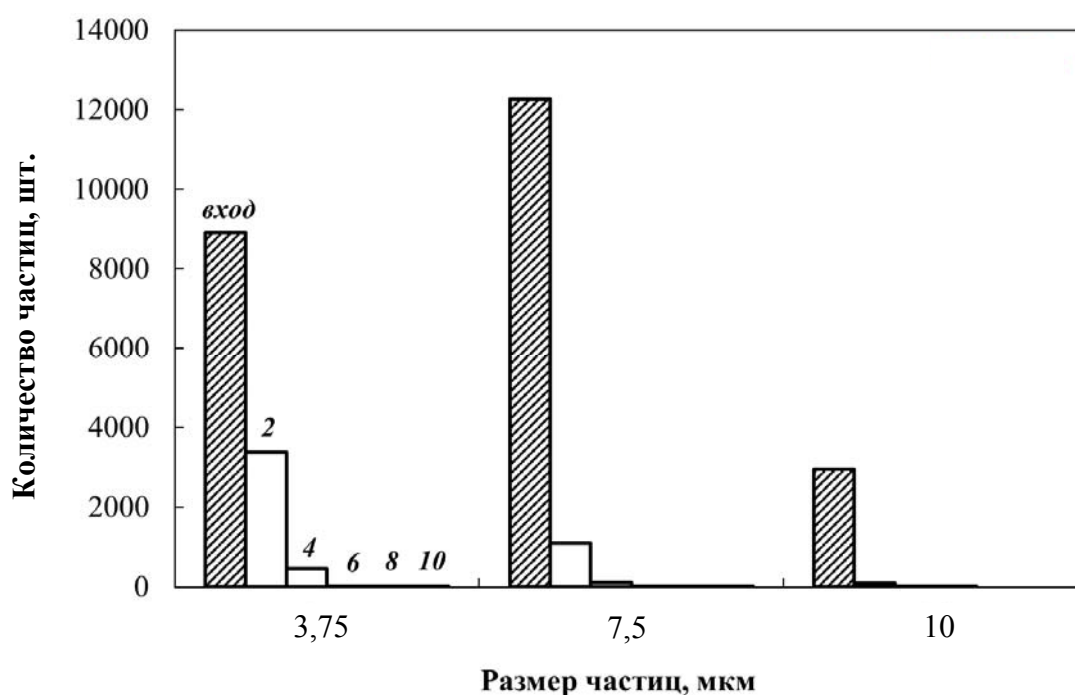


Рис. 8г. Распределение частиц по размерам (3,75; 7,5; 10 мкм) во входном и выходном потоках для комбинации «МБ/Гр» с давлением каландрирования: 2, 4, 6, 8, 10 – 0, 2, 6, 10, 15 кгс/см²

Очевидно, что при небольших давлениях, в первую очередь, изменяется поровая структура ВПМ «Гр», что связано с его большей деформационной способностью в сравнении с более жестким ВПМ «МБ».

Заключение

Таким образом, исследованы закономерности взаимосвязи структурно-морфологических особенностей комбинированных (слоистых) волокнисто-пористых систем «политетрафторэтилен – полипропилен» с их фильтрационными свойствами. Показано, что обусловленные каландрированием изменения поровой структуры волокнистых материалов позволяют влиять на характеристики фильтрования. Установлено, что существует интервал давления каландрирования (2–10 кгс/см²) при котором уменьшается размер пор и обеспечивается эффективность фильтрации 99,90–99,97 % при перепаде давления менее 10 кПа. Комбинированные материалы «МБ/Гр» могут выступать в качестве фильтров, в которых реализуются различные физические механизмы взаимодействия волокон ВПМ с фильтруемыми газожидкостными потоками.

Пограничные эффекты взаимодействия слоев волокон ВПМ разного типа, отличающихся по физическим и химическим свойствам, имеют сложный характер, и при высокой степени каландрирования, возможно, следует учитывать действие поверхностных сил волокон друг на друга. Роль межфазных взаимодействий между контактирующими и способными перемещаться в поровом пространстве волокнами различной природы под влиянием внешних (как механических, так и физических) факторов крайне интересна и нуждается в дальнейшем исследовании.

Полученные результаты могут быть использованы при создании высокоэффективных комбинированных фильтров из полимерных волокнисто-пористых материалов.

Литература

1. Страус, В. Промышленная очистка газов / В. Страус. – М. : Химия, 1981. – 616 с.
2. Оценка влияния развития экономики на загрязнение воздушной среды / П. В. Дружинин [и др.] // Экон. и соц. перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2020. – Т. 13, № 2. – С. 125–142.
3. Полимерные волокнисто-пористые фильтрующие материалы / А. Г. Кравцов [и др.] ; под общ. ред. Ю. М. Плескачевского. – Гомель : БелГУТ, 2012. – 319 с.
4. Шумская, В. Ю. Фильтрация водных аэрозолей композитными волокнисто-пористыми системами на основе полипропилена и политетрафторэтилена / В. Ю. Шумская, А. Я. Григорьев // Полимер. материалы и технологии. – 2021. – Т. 7, № 2. – С. 39–47.
5. Полимерные волокнистые melt-blown материалы / В. А. Гольдаде [и др.]. – Гомель : ИММС НАН Беларуси, 2000. – 260 с.
6. Лазерная абляция политетрафторэтилена / П. Н. Гракович [и др.]. // Рос. хим. журн. – 2008. – Т. 52, № 3. – С. 97–105.
7. Brown, R. C. Air filtration: An Integrated approach to the theory and applications of fibrous filters / R. C. Brown. – New York : Oxford : Pergamon Press, 1993. – 296 p.
8. Газожидкостной порометр POROLUX 500. – Режим доступа: <https://www.czl.ru/catalog/microstructure/porometers/porolux-500.html>. – Дата доступа: 24.05.2023.
9. Морфологические, физико-химические особенности многократной обработки пленок полиэтилена в плазме барьерного разряда / О. А. Саркисов [и др.] // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2021. – № 1 (84). – С. 42–52.
10. Кравцов, А. Г. Волокнистые фильтры : монография / А. Г. Кравцов. – Saarbrücken : LAPLAMBERT Academic Publishing, 2015. – 212 с.
11. Andan, S. Modeling of drainage in coalescence filtration : doctor of philosophy /

- S. Andan. – Akron, 2010. – 196 p.
12. Patel, S. U. Improving performance and drainage of coalescing filters : doctor of philosophy / S. U. Patel. – Akron, 2010. – 226 p.
13. Кравцов, А. Г. Способ анализа структуры и свойств регенерированных полимерных волокнистых фильтроматериалов для тонкой очистки воздуха / А. Г. Кравцов, М. В. Тумилович, Л. П. Пилиневич // Докл. БГУИР. – 2021. – № 19 (1). – С. 96–104.

References

1. Straus V. *Industrial gas cleaning*. Moscow, Khimiya Publ., 1981. 616 p. (in Russian).
2. Druzhinin P. V., Shkiperova G. T., Potasheva O. V., Zimin D. A. Assessment of the impact of economic development on air pollution. *Ekonomicheskie i sotsial'nye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz = Economic and social changes: facts, trends, forecast*, 2020, vol. 13, no. 2, pp. 125–142 (in Russian).
3. Kravtsov A. G., Marchenko S. A., Zotov S. V., Stankevich V. M., Naumov A. D. *Polymer fibrous-porous filtering materials*. Ed. Pleskachevskii Yu. M. Gomel', BelGUT Publ., 2012. 319 p. (in Russian).
4. Shumskaya V. Yu, Grigor'ev A. Ya. Filtration of aqueous aerosols by composite fibrous-porous systems based on polypropylene and polytetrafluoroethylene. *Polimernye materialy i tekhnologii*, 2021, vol. 7, no. 2, pp. 39–47 (in Russian).
5. Gol'dade V. A., Makarevich A. V., Pinchuk L. S., Sikanevich A. V., Chernorubashkin A. I. *Polymer fibrous melt-blown materials*. Gomel', IMMS NANB Publ., 2000. 260 p. (in Russian).
6. Grakovich P. N., Ivanov L. F., Kalinin L. A., Ryabchenko I. L., Tolstopyatov E. M., Krasovskii A. M. Laser ablation of polytetrafluoroethylene. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal*, 2008, vol. 52, no. 3, pp. 97–105 (in Russian).
7. Brown R. C. *Air filtration: An Integrated approach to the theory and applications of fibrous filters*. New York, Oxford, Pergamon Publ., 1993. 296 p.
8. *Gas-liquid porometer POROLUX 500*. Available at: <https://www.czl.ru/catalog/microstructure/porometers/porolux-500.html> (accessed 25.05.2023) (in Russian).
9. Sarkisov O. A., Mikhalko A. M., Lapitskaya V. A., Kuznetsova T. A., Grakovich P. N., Rogachev A. A. Morphological, physico-chemical features of multiple processing of polyethylene in barrier discharge plasma. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2021, no. 1 (84), pp. 42–52 (in Russian).
10. Kravtsov A. G. *Fiber filters*. Saarbrücken, LAPLAMBERT Academic Publ., 2015. 212 p. (in Russian).
11. Andan, S. *Modeling of drainage in coalescence filtration: doctor of philosophy*. Akron, 2010. 196 p.
12. Patel S. U. *Improving performance and drainage of coalescing filters: doctor of philosophy*. Akron, 2010. 226 p.
13. Kravtsov A. G., Tumulovich M. V., Pilinevich L. P. A Method for Analyzing the Structure and Properties of Regenerated Polymer Fibrous Filter Materials for Fine Air Purification. *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki*, 2021, no. 19 (1), pp. 96–104 (in Russian).