

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ГИБРИДНОГО ФИЛЬТРУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА

И.А. Мик, В.Н. Горев

Гибридный фильтрующий материал представляет собой композицию двух типов волокон: первый тип волокон обеспечивает несущий каркас материала и практически не участвуют в процессе фильтрации, второй тип волокон выполняет фильтрующую функцию. Материал состоит из объемного связного каркаса (матрицы) из экструдированных полипропиленовых волокон диаметром 100-300 мкм и фильтрующих волокон полиамида диаметром 50-500 нм, полученных методом электроформования, распределенных в объемной матрице. Согласно известным механизмам фильтрации (инерция, диффузия, зацепление) для каждого типа волокон, при заданных условиях среды можно прогнозировать характеристики фильтра. Разработанная физико-математическая модель при аддитивном учёте двух типов волокон позволяет прогнозировать фильтрующую способность материала. В результате исследований проведена апробация модели на данных ресурсных испытаний образцов материала профилированных по толщине фильтрующими волокнами. Ресурсным загрязнителем гибридных фильтров был выбран аэрозоль диэтилгексилсебацината. Полученные зависимости коэффициента фильтрующего действия от периода ресурсных испытаний указывают на то, что фильтрующая способность материала будет тем выше, чем более равномерно загрязнитель распределяется по толщине фильтра. Формование профилированных по структуре фильтров позволит создать качественный наукоёмким продукт при минимальных затратах производства.

Ключевые слова: волокнистый материал, эффективность фильтрации, перепад давления, коэффициент фильтрующего действия, электроформование.

ВВЕДЕНИЕ

Моделирование работы гибридного фильтрующего материала позволит: получить удобный аналитический «инструмент» способный на основании заданных параметров формования фильтра прогнозировать фильтрующую способность изделия. С этой целью на основе проведённого анализа научной периодики были выбраны физические модели фильтрации, отвечающие параметрам материала. Базируясь на выбранных теоретических и полупирических выкладках была разработана численная модель фильтрации аэрозольных частиц гибридным фильтром (таблица 1).

Гибридный фильтрующий материал, состоит из объемного связного каркаса (матрицы) из экструдированных полипропиленовых (ПП) волокон диаметром 100-300 микрометров и фильтрующих волокон полиамида (ПА) диаметром 50-500 нанометров, полученных методом электроформования [1], распределенных в объемной матрице. Отличие диаметров мелкомасштабных и крупномасштабных волокон в составе фильтрующего матери-

ала – 3 порядка. Подробно способ формования и морфология гибридного фильтрующего материала отражены в [2 - 4].

В численной физико-математической модели гибридного материала учитывались различные параметры фильтра. Например, для определения геометрических параметров составных волокон цилиндрического фильтра, рассчитывался геометрический объем и площадь фильтра в целом, что можно сделать, измерив внешний, внутренний радиусы, и длину фильтра.

Расчет перепада давления на гибридном фильтре проводился с помощью обобщённой формулы гидродинамического сопротивления волокнистого слоя [5] (см. формулы (1 — 3)). Следует отметить, что формула гидродинамического сопротивления не учитывает различные дефекты волокон (разброс: размеров волокон по длине, площади поперечного сечения, неравномерности слоя по толщине). Зная вклад каждого типа волокон можно рассчитать суммарный перепад давления на гибридном материале (см. формулу (4)).

Для расчёта эффективности фильтрации предполагалось, что суммарный коэффици-

ент захвата частиц равен сумме коэффициентов, соответствующих: диффузии, зацеплению и инерции [6]. Эффективность фильтрации на волокнах ПА определялась по формуле (5) [6]. Формулы (6 - 9) использовались для расчёта коэффициентов захвата частиц ПА волокон: диффузионный коэффициент захвата [6], касательный коэффициент захвата

[6], неаддитивного диффузионно-касательного коэффициента захвата [7], инерционного коэффициента захвата [6]. Число Стокса, число Пекле, коэффициент диффузии частиц, коэффициент Канингема, фактор Кувабары, отношение диаметра частиц к диаметру волокон для ПА волокон рассчитывались по формулам (10 — 15).

Таблица 1 – Теоретические и полуэмпирические выкладки модели гибридного материала для волокон двух типов

$\Delta P_{па} = \frac{4\mu M_{ПА} V_{ср}}{\rho_{па} (0,5d_{па})^2 (-0,5 \ln(\beta_{па}) - 0,48 + 0,64\beta_{па} + 1,43(1 - \beta_{па}) \frac{\lambda}{0,5d_{па}})}$	(1)
$V_{ср} = \frac{V_{возд}}{P_{пп}}$	(2)
$\Delta P_{пп} = \frac{4\mu M_{ПП} V_{возд}}{\rho_{пп} (0,5d_{пп})^2 (-0,5 \ln(\beta_{пп}) - 0,48 + 0,64\beta_{пп} + 1,43(1 - \beta_{пп}) \frac{\lambda}{0,5d_{пп}})}$	(3)
$\Delta P_{сумм} = \Delta P_{пп} + \Delta P_{па}$	(4)
$E_{па} = 1 - e^{-4\beta_{па}(\eta_{D па} + \eta_{R па} + \eta_{DR па} + \eta_{stk па}) \frac{d_{ф}}{\pi d_{па}}}$	(5)
$\eta_{D па} = 2,7 Pe_{па}^{-\frac{2}{3}}$	(6)
$\eta_{R па} = \frac{0,5}{Ku_{па}} \left(\frac{1}{1 + R_{па}} - (1 + R_{па}) + 2(1 + R_{па})(1 + 2Kn_{па}) \ln(1 + R_{па}) \right)$	(7)
$\eta_{DR па} = 1,24 (Ku_{па} Pe_{па})^{-\frac{1}{2}} R_{па}^{\frac{2}{3}}$	(8)
$\eta_{stk па}(Stk_{па}) = \begin{cases} 0, & Stk < 0,2 \\ 0,227 (Stk_{па} - 0,045), & 0,2 \leq Stk \leq 0,8 \\ 0,45 (\ln(Stk_{па} + 0,4)), & Stk > 0,8 \end{cases}$	(9)
$Stk_{па} = 2 Ck \rho_{ч} V_{ср} \frac{d_{ч}^2}{9\mu d_{па}}$	(10)
$Pe_{па} = V_{ср} \frac{d_{па}}{D}$	(11)
$D = Ck \frac{kT_{возд}}{3\pi\mu d_{ч}}$	(12)
$Ck = 1 + 2 \frac{\lambda}{d_{ч}} \left(1,257 + 0,4e^{-1,1 \frac{d_{ч}}{2\lambda}} \right)$	(13)
$Ku_{па} = -0,5 \ln(\beta) - 0,52 + 0,64\beta^2$	(14)
$R_{па} = \frac{d_{ч}}{d_{па}}$	(15)
$E_{пп} = 1 - e^{-4\beta_{пп}(\eta_{D пп} + \eta_{R пп} + \eta_{DR пп} + \eta_{stk пп}) \frac{d_{ф}}{\pi d_{пп}}}$	(16)
$\eta_{D пп} = 2,9 Ku_{пп}^{-\frac{1}{3}} Pe_{пп}^{-\frac{2}{3}}$	(17)
$\eta_{R пп} = \frac{0,5(1 + R_{пп})}{Ku_{пп}} \left(2 \ln(1 + R_{пп}) - 1 + \beta_{пп} + \frac{1}{1 + R_{пп}} \right)^2 (1 - 0,5\beta_{пп}) - 0,5\beta_{пп}(1 + R_{пп})^2$	(18)
$\eta_{DR пп} = 1,24 (Ku_{пп} Pe_{пп})^{-\frac{1}{2}} R_{пп}^{\frac{2}{3}}$	(19)
$\eta_{stk пп} = \frac{0,5Stk}{Ku_{пп}^2} ((29,6 - 28\beta_{пп}^{0,62}) R_{пп}^2 - 27,5 R_{пп}^{2,8})$	(20)
$Stk_{пп} = Ck \rho_{ч} V_{ср} \frac{d_{ч}^2}{\mu d_{пп}}$	(21)
$Pe_{пп} = V_{ср} \frac{d_{пп}}{D}$	(22)
$Ku_{пп} = -0,5 \ln(\beta_{пп}) + \beta_{пп} - 0,25\beta_{пп}^2 - 0,75$	(23)
$R_{пп} = \frac{d_{ч}}{d_{пп}}$	(24)
$E = 1 - e^{-4\beta_{па}(\eta_{D па} + \eta_{R па} + \eta_{DR па} + \eta_{stk па}) \frac{d_{ф}}{\pi d_{па}}} * e^{-4\beta_{пп}(\eta_{D пп} + \eta_{R пп} + \eta_{DR пп} + \eta_{stk пп}) \frac{d_{ф}}{\pi d_{пп}}}$	(25)

Эффективность фильтрации на волокнах ПП определялась по формуле (16) [6]. Формулы (17 — 20) использовались для расчёта коэффициентов захвата частиц ПП волокон: диффузионный коэффициент захвата [6], касательный коэффициент захвата [8], неаддитивного диффузионно-касательного коэффициента захвата [8], инерционного коэффициента захвата [9, 10]. Число Стокса, число Пекле, коэффициент диффузии частиц, коэффициент Канингема, фактор Кувабары [11], отношение диаметра частиц к диаметру волокон для ПП волокон рассчитывались по формулам (21 — 24).

В результате эффективность фильтрации гибридного материала определяется общим выражением (см. формулу (25)). Важно отметить, что электрическое взаимодействие частиц с волокном в модели гибридного материала не учитывалось, т.к. скорость фильтрации достаточно высокая [6].

С целью прогнозирования фильтрующей способности гибридного материала было проведено моделирование работы воздушного фильтра. Чтобы провести моделирование работы фильтра в данной работе выбран подход учёта изменения всех параметров фильтрующего материала при фильтрации выбранного ансамбля аэрозоля. Данный фильтрующий материал представляет собой слоистую структуру, которая состоит из волокон двух типов: каркасных ПП и фильтрующих ПА. Если известно, сколько частиц фильтрует каждый тип волокон в слое, то можно вычислить суммарный коэффициент проскока для определенного диаметра частиц:

$$K^i = \prod_{j=1}^N K_{ПП}^{ij} K_{ПА}^{ij} \quad (26)$$

$$K_{ПА}^{ij} = K_{ПА}^{ij} (\rho_{ПА}^{ij}, d_{ПА}^{ij}, n^{ij}, L_{ПА}^j) \quad (27)$$

$$K_{ПП}^{ij} = K_{ПП}^{ij} (\rho_{ПП}^{ij}, d_{ПП}^{ij}, K_{ПА} n^{ij}, L_{ПП}^j) \quad (28)$$

где K^i — проскок гибридного материала для определенного диаметра частиц i -го загрязнения; $K_{ПА}^{ij}$, $\rho_{ПА}^{ij}$, $d_{ПА}^{ij}$ — проскок, плотность упаковки волокон в слое, диаметр волокон после фильтрации на ПА волокнах i -го загрязнения в j -м слое фильтра; n^{ij} — количество частиц i -го загрязнения перед j -м слоем ПА волокон; $K_{ПП}^{ij}$, $\rho_{ПП}^{ij}$, $d_{ПП}^{ij}$ — проскок, плотность упаковки воло-

кон в слое, диаметр волокон после фильтрации на ПП волокнах i -го загрязнения в j -м слое фильтра; $K_{ПА} n^{ij}$ — количество частиц i -го загрязнения перед j -м слоем ПП волокон; N — количество слоёв материала; L — количество загрязнений.

Системы уравнений (26 — 28) позволяют найти массу зацепленных частиц после i -го загрязнения, а значит суммарную массу частиц и массу частиц в конкретном слое. На основании вышеперечисленного можно записать эффективность фильтрации после i -го загрязнения:

$$Eff_{сумм} = 1 - K^i \quad (29)$$

где $Eff_{сумм}$ — эффективность фильтрации гибридного материала для определенного диаметра частиц после всех загрязнений. Зная проскок для каждого диаметра из ансамбля частиц можно рассчитать эффективность фильтрации гибридного материала.

Для определения начальных перепадов давлений создаваемых ПА и ПП волокнами использовались значение экспериментального перепада давления гибридного материала и материала, не содержащего фильтрующие волокна (ПП матрицы) из которого по обобщённой формуле гидродинамического перепада давления (формулы 1, 3) находились аэродинамические диаметры волокон. Из параметров эксперимента: расхода ПА раствора электроформования и расхода ПП экструдированного расплава находились начальные плотности упаковки и длина волокон в слое [2, 3]. Рост плотности упаковки и диаметра волокон учитывался через объём осевшего в слое аэрозоля, в приближении, что жидкий аэрозоль равномерно распределяется по всей длине фильтрующих волокон.

Зная параметры фильтра в каждом слое имеется возможность вычислить суммарный перепад давления:

$$\Delta P_{сумм} = \sum_{j=1}^N \Delta P^{ij} \quad (30)$$

$$\Delta P^{ij} = \Delta P_{ПА}^{ij} + \Delta P_{ПП}^{ij} \quad (31)$$

$$\Delta P_{ПА}^{ij} = \Delta P_{ПА}^{ij} (\rho_{ПА}^{ij}, d_{ПА}^{ij}) \quad (32)$$

$$\Delta P_{ПП}^{ij} = \Delta P_{ПП}^{ij} (\rho_{ПП}^{ij}, d_{ПП}^{ij}) \quad (33)$$

где $\Delta P_{ПА}^{ij}$, $\Delta P_{ПП}^{ij}$, и ΔP^{ij} — перепады давления i -го загрязнения в j -м слое, создаваемые ПА и ПП волокнами и их результирующее значение, соответственно.

АПРОБАЦИЯ МОДЕЛИ

Ресурсным загрязнителем гибридных фильтров был выбран аэрозоль диэтилгексилсебагината. Выбор жидких аэрозольных частиц обусловлен тем, что наиболее проблемной средой для фильтрации высокоэффективных HEPA (High-Efficiency Particulate Arresting) фильтров является аэрозольные жидкие частицы. Согласно литературным источникам жидкие частицы в отличие от твердых частиц способны уменьшать эффективность фильтрации [12, 13]. Также аэрозоль диэтилгексилсебагината обладает: заведомо проверенной стабильностью генерации частиц, что в условиях ресурсных испытаний является приоритетным фактором.

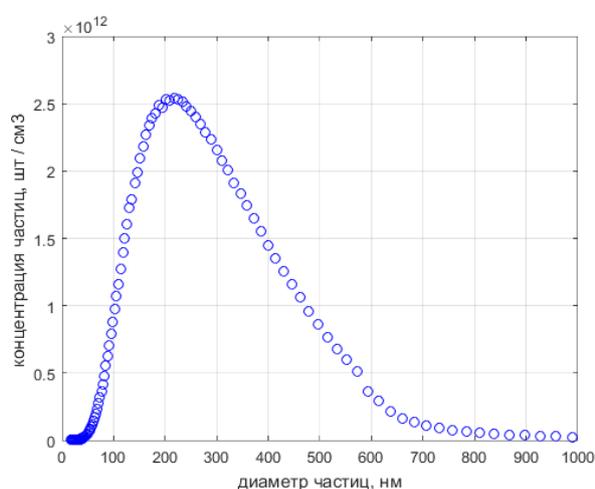


Рисунок 1 – Зависимость числа частиц диэтилгексилсебагината от их диаметра

Ресурсные испытания проводились согласно методике, подробно описанной в работе [2] при линейной скорости фильтрации 5 см/с. С той разницей, что ресурсные испытания в отличие от проверки класса воздушного фильтра (ГОСТ ИСО 14644-1-2002) проводились на протяжении нескольких часов при наибольшей концентрации частиц на входе образца (рис 1). Максимум концентрации частиц на входе устанавливался исходя из близкого к максимальному разрешению спектрометра частиц (TSI 3938) в объёме [2]. Каждой точке эксперимента присваивался массив значений: № образца, время «запыления», перепад давления, количество частиц перед образцом, количество частиц на выходе образца. Так как в ресурсном эксперименте использовались высокие концентрации аэрозоля существовала сложность измерить

начальный перепад давления. Поэтому начальные перепады давления на образцах измерялись заранее в потоке «чистого» воздуха.

Выбор скорости фильтрации обусловлен следующими фактами и рассуждениями: обычно с увеличением фронтальной скорости эффективность фильтрации снижается, и снижение растёт при уменьшении размера частиц. При использовании нановолокон в применении фильтрации авторы работы [14] рекомендуют использовать минимально возможную фронтальную скорость фильтрации; в противном случае фильтрующая способность резко падает. Этот эффект связан с тем, что увеличение фронтальной скорости («effect face velocity») уменьшает время удерживания частиц в структуре нановолокон, что снижает вероятность столкновения частиц с волокнами через броуновское движение.

Диэтилгексилсебагинат это нерастворимая жидкость с низкой скоростью испарения и плотностью 912 кг / м³ [15]. При проведении тестовых ресурсных экспериментов с диэтилгексилсебагинатом, было замечено, что масса осевшего аэрозоля много ниже, чем интегральная масса аэрозоля поданного на вход исследуемых образцов. Масса осевшего аэрозоля контролировалась взвешиванием образцов на аналитических весах (весы лабораторные, ВЛ-224, ГР № 53573-13). Заниженное значение массы после испытаний объясняется тем, что аэрозольная жидкость, задержанная в виде частиц фильтрующим материалом, испаряется в потоке воздуха (5 см/с). Факт испарения диэтилгексилсебагината подтвержден и является рыночным преимуществом этого стабильного монодисперсного тестового аэрозоля [16]. Испарение диэтилгексилсебагината в процессе эксплуатации позволяет, не уменьшая ресурс изделия провести его тестирование на класс фильтрации.

Поэтому, экспериментальным путём был получен коэффициент улетучивания диэтилгексилсебагината для режима испытания образцов фильтров. Проверка коэффициента выполнялась как на образцах гибридного фильтра, так и на боросиликатной фильтрующей ткани, которую используют отечественные и зарубежные производители высокоэффективных HEPA и ULPA (Ultra Low Penetration Air) фильтров. Был создан образец из фильтрующей ткани для испытательного стенда и протестирован на фильтрующую способность, при 5 см/с. Интегральная эффективность фильтрации боросиликатной ткани составила

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ГИБРИДНОГО ФИЛЬТРУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА

99 %. В результате экспериментов, коэффициент улетучивания аэрозольного загрязнителя (за 2,5 часа эксперимента) из фильтра для испытательного режима составил 7,5.

Для ресурсных испытаний были получены два вида материала с постоянным и линейным распределениями фильтрующих волокон. Причем суммарный расход раствора использованного для создания материала и, следовательно, суммарная длина фильтрующих волокон были одинаковыми. В результате испытывались три типа образцов с равным суммарным количеством фильтрующих волокон: образец с постоянной концентрацией фильтрующих волокон в каждом слое; образец с линейным профилем установленный «засеянными» слоями к входящему потоку аэрозольных частиц; образец с линейным профилем установленный разреженными слоями к входящему потоку аэрозольных частиц.

Чтобы сравнить экспериментальные данные ресурсных испытаний с моделью, в программе расчёта использовались параметры ранее созданных воздушных фильтров и режима испытаний: линейная скорость потока

воздуха 5 см/с; цилиндрический фильтр: длина цилиндра 800 мм, внутренний диаметр 83 мм, внешний диаметр 103 мм; при этом расход воздуха моделируемого фильтра составит 42 м³/час. Как и для ресурсных испытаний, в модели использован экспериментальный ансамбль жидких частиц (аэрозоля) генератора Topas ATM 226 диэтилгексилсебацата (рис. 1). На рис. 2 – 6 представлены данные ресурсного эксперимента и моделирования: зависимости характеристик фильтрации от массы частиц накопленных на крупногабаритном фильтре. Начальная плотность упаковки для каждого слоя фильтра изображена на рис. 2 а. На рис. 2 б зависимость эффективности фильтрации для образца с равномерным распределением волокон.

Для не оптимального распределения фильтрующих волокон, где основная масса частиц задерживается в первых слоях фильтра на рис. 3 а наблюдается наиболее интенсивное разрушение (релаксация) волокон: экспериментальная кривая пересекает модельный расчёт. На рис. 3 б резкая деградация эффективности фильтрации не наблюдается.

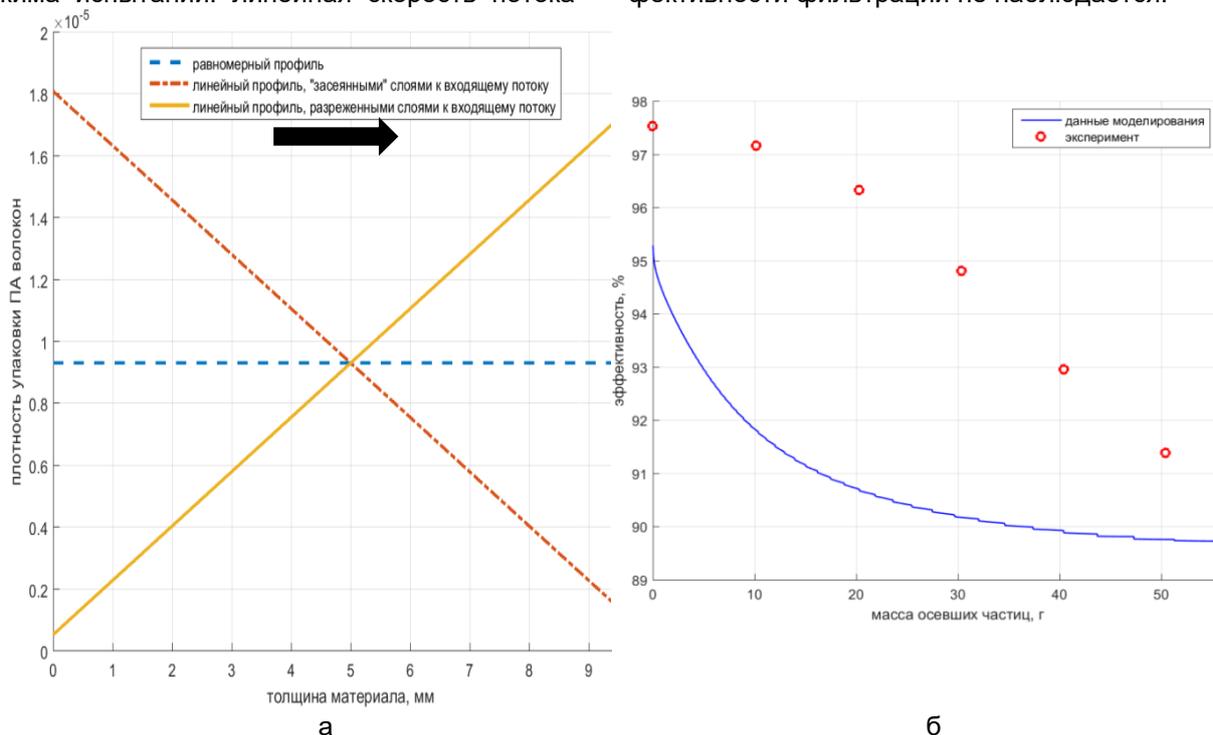


Рисунок 2 – Данные моделирования и эксперимента: а — зависимость плотности упаковки фильтрующих волокон от толщины материала (стрелкой показано направление потока аэрозольных частиц); б — зависимость эффективности фильтрации образца с равномерным распределением фильтрующих волокон от массы осевших частиц

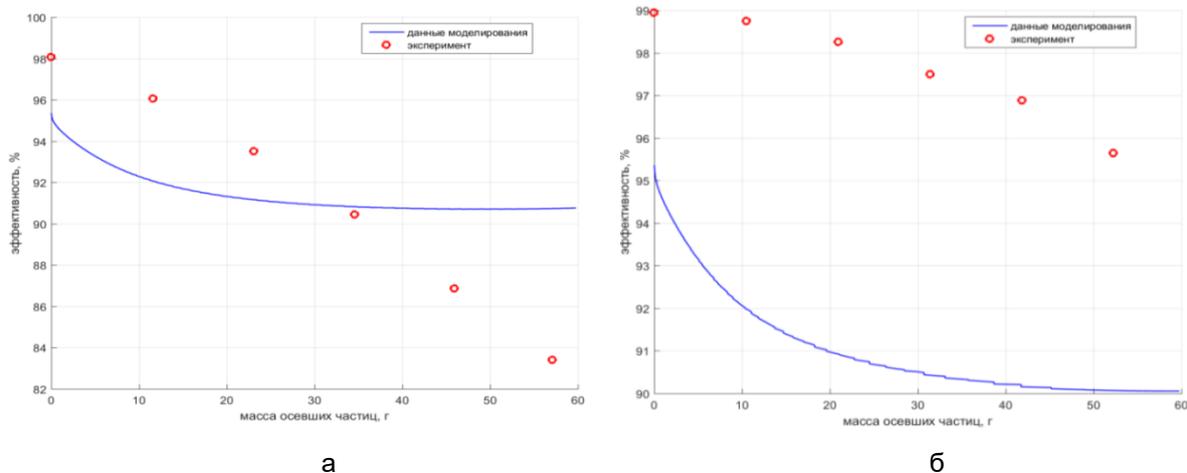


Рисунок 3 – Данные моделирования и эксперимента: а — зависимость эффективности фильтрации образца с линейным профилем установленный «засеянными» слоями к входящему потоку аэрозольных частиц от массы осевших частиц; б — зависимость эффективности фильтрации образца с линейным профилем установленный разреженными слоями к входящему потоку аэрозольных частиц от массы осевших частиц

На рис. 4 а – б и 5 а зависимости перепада давлений от массы осевших на фильтре частиц. Экспериментальные данные показывают большее значение перепада давления, чем данные получены при моделировании фильтра. Предположительно это может быть связано с допущениями, использованными в модели. А именно, согласно модели, рост среднего диаметра волокон происходит мгновенно пропорционально массе прилетевших частиц. Для реального фильтра жидкие частицы собираются в агломерации забивая

поры материала, что приводит к большему сопротивлению потоку воздуха.

Отношение логарифма проскока к перепаду давления называется коэффициентом фильтрующего действия характеризующий способность материала к улавливанию аэрозолей [1, 6]:

$$КФД = -\frac{\lg(1 - E)}{\Delta P_{сумм}} \quad (4.2)$$

На рис. 5 б и 6 а - б итоговые характеристики образцов фильтрующего материала (КФД).

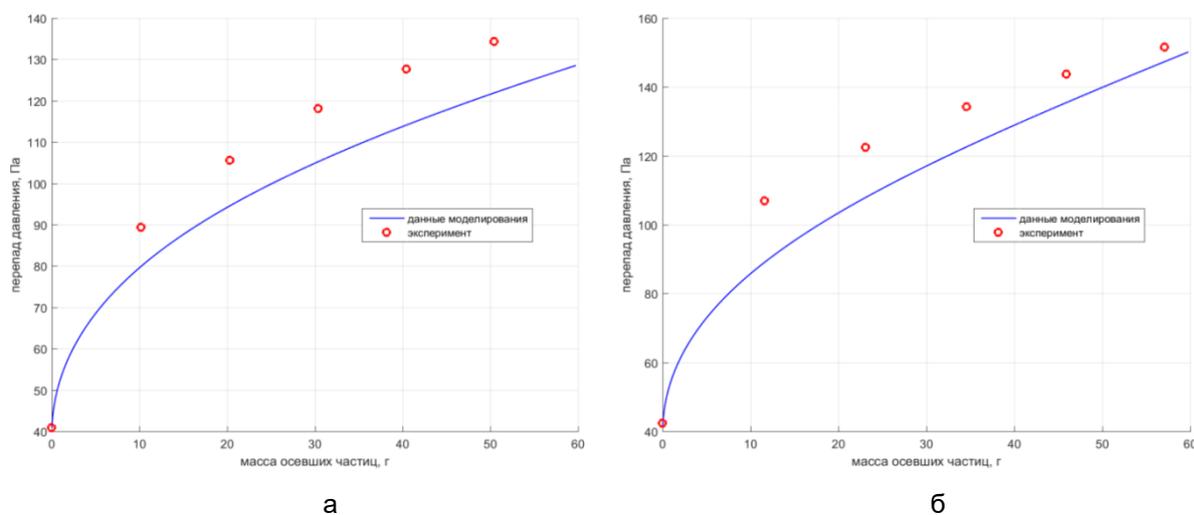


Рисунок 4 – Данные моделирования и эксперимента: а — зависимость перепада давления образца с равномерным распределением фильтрующих волокон от массы осевших частиц; б — зависимость перепада давления образца с линейным профилем установленный «засеянными» слоями к входящему потоку аэрозольных частиц от массы осевших частиц

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ГИБРИДНОГО ФИЛЬТРУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА

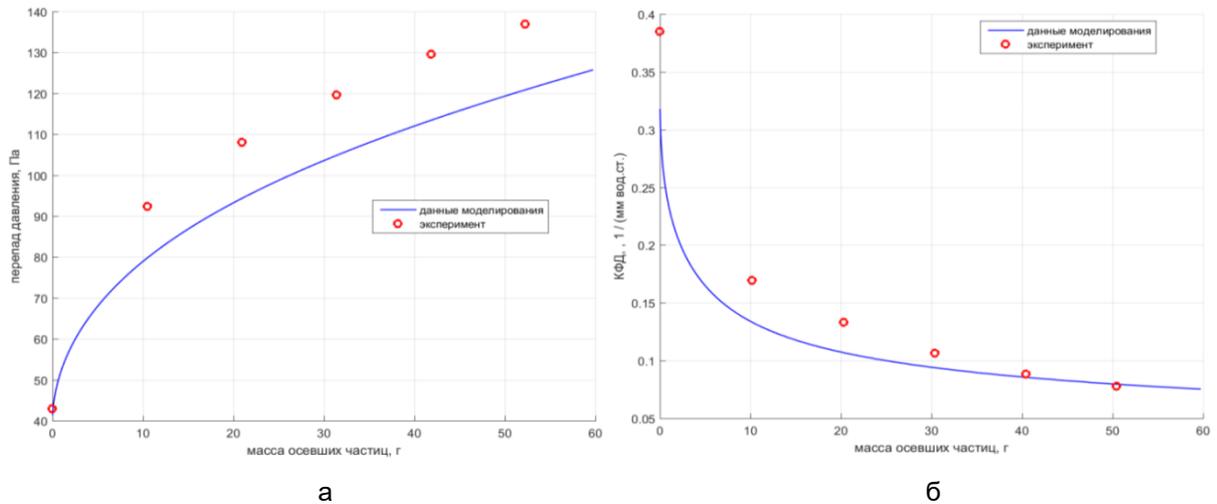


Рисунок 5 – Данные моделирования и эксперимента: а — зависимость перепада давления образца с линейным профилем установленный разреженными слоями к входящему потоку аэрозольных частиц от массы осевших частиц; б — зависимость КФД образца с равномерным распределением фильтрующих волокон от массы осевших частиц

В результате учёта перепада давления и эффективности фильтрации в КФД образец с линейным распределением, установленный разреженными слоями к входящему потоку аэрозольных частиц, показывает наименьшую скорость деградации фильтрующих свойств материала. Вероятно, это связано с наименьшей степенью разрушения волокон. В случае образца с линейным профилем установленный «засеянными» слоями к входящему потоку аэрозольных частиц экспериментальная

зависимость пересекает кривую моделирования при достижении 20 г для крупногабаритного фильтра. Предположительно релаксация (разрушение) фильтрующих ПА волокон снижает эффективность гибридного фильтрующего материала, что косвенно подтверждается лучшим согласием модели и эксперимента для более оптимальных образцов в смысле распределения загрязнителя в материале фильтра.

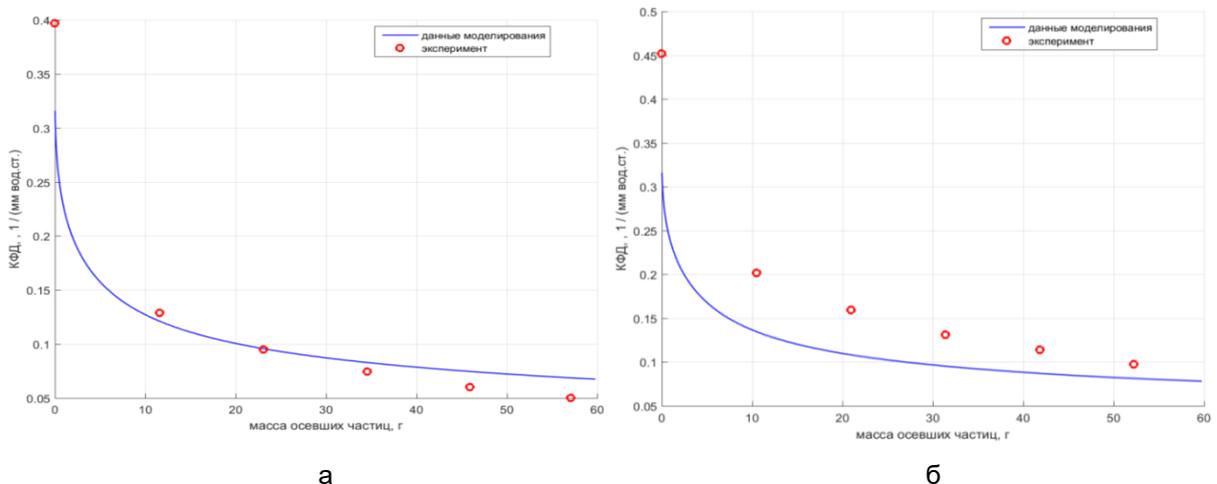


Рисунок 6 – Данные моделирования и эксперимента: а — зависимость КФД образца с линейным профилем установленный «засеянными» слоями к входящему потоку аэрозольных частиц от массы осевших частиц; б — зависимость КФД образца с линейным распределением установленный разреженными слоями к входящему потоку частиц от массы осевших частиц

В случае жидких аэрозольных частиц для создания ресурс пригодного фильтра требуется максимально равномерный рост среднего диаметра фильтрующих волокон по толщине фильтра, что позволит создать меньшую нагрузку на фильтрующие волокна и продлить срок эксплуатации изделия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые проведены ресурсные испытания образцов функционально-градиентного материала HEPA фильтра. На экспериментальных данных испытаний образцов с заданным распределением фильтрующих волокон в объемном каркасе материала выполнена апробация модели.

В ходе испытаний установлено, что функционально-градиентный материал имеет более высокую фильтрующую способность, чем фильтр с равномерным распределением фильтрующих волокон. При этом величина энергозатрат и количества сырья для производства, профилированного и равномерного фильтра одинаковы.

Получен прикладной аналитический «инструмент», способный на основании заданных технологических параметров формирования фильтра прогнозировать фильтрующие характеристики воздушного фильтра. На основе модели целесообразно проводить исследования связанные с оптимизацией структуры гибридного фильтрующего материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петрянов, И.В. Волокнистые фильтрующие материалы ФП [Текст] / И.В. Петрянов, В.И. Козлов, П.И. Басманов, Б.И. Огородников. – М.: Знание, 1968. – 78 с.
2. Мик, И.А. Метод формирования высокоэффективного самонесущего композитного фильтрующего материала из полимерных микро- и нановолокон [Текст] / И.А. Мик, В.Н. Горев, Д.А. Трубицын // Экология и промышленность России. – 2017. – Т. 21, № 4. – С. 13–19.
3. Мик, И.А. Изучение динамики зарядки пористого диэлектрика при формировании высокоэффективных аэрозольных фильтров методом гибридного формирования [Текст] / И.А. Мик, В.Н. Горев, М.И. Тырышкин, Д.А. Трубицын // Пластические массы. – 2017. – №7-8, – С. 55–64.
4. Пат. 2016106119 Российская Федерация, В01D 39/16. Объемный фильтр из нетканого самонесущего материала / Д.А. Трубицын, В.Н. Горев, И.А. Мик; заявл. 24.02.2016; опубл. 29.08.2017, Бюл. № 25.
5. Дружинин, Э.А. Производство и свойства фильтрующих материалов Петрянова из ультратонких полимерных волокон / Э.А. Дружинин. – М.: ИздАТ, 2007. – 280 с.

6. Будыка, А.К. Атмосферный мониторинг и диагностика аэрозолей: д-ра физ.-мат. наук: 02.00.04 / Будыка Александр Константинович. – М., 2001. – 219 с.

7. Kirsh, A.A. Theory of aerosol filtration with fibrous filters [Текст] / A.A. Kirsh, I.B. Stechkina // New York: Wiley. – 1978. – P. 165-256.

8. Lee, K.W. Theoretical study of aerosol filtration by fibrous filters [Текст] / K.W. Lee, B.Y.H. Liu // Aerosol Science and Technology. – 1982. – № 2. – Vol. 1. – P. 147-161.

9. Stechkina, I.B. Studies on Fibrous Aerosol Filters—IV Calculation of Aerosol Deposition in Model Filters in the Range of Maximum Penetration [Текст] / I.B. Stechkina, A.A. Kirsch, N.A. Fuchs // The Annals of Occupational Hygiene. – 1969. – № 1. – Vol. 12. – P. 1-8.

10. Wang, C. Removal of nanoparticles from gas streams by fibrous filters: A review [Текст] / C. Wang, Y. Otani // Industrial and Engineering Chemistry Research. – 2012. – № 1. – Vol. 42. – P. 5-17.

11. Kuvabara, S. The forces experienced by randomly distributed parallel cylinders or spheres in viscous flow at small Reynolds numbers [Текст] / Kuvabara S. // Journal of the Physical Society of Japan. – 1959. – Vol. 14. – P. 527-532.

12. Barrett, L.W. Aerosol loading performance of electret filter media [Текст] / L.W. Barrett, A.D. Rousseau // American Industrial Hygiene. – 1998. – № 8. – Vol. 59. – P. 532-539.

13. Gupta, A. Effect of humidity and particle hygroscopicity on the mass loading capacity of high efficiency particulate air (HEPA) filters [Текст] / A. Gupta, V.J. Novick, P. Biswas, P.R. Monson // Aerosol Science. – 1993. – № 1. – Vol. 1. – P. 94-107.

14. Leung, W.W.F. Effect of face velocity, nanofiber packing density and thickness on filtration performance of filters with nanofibers coated on a substrate [Текст] / W.W.F. Leung, C.H. Hung, P.T. Yuen // Separation and Purification Technology. – 2010. – Vol. 71. – P. 30-37.

15. Zhang, Z. Experimental and numerical investigation of airflow and contaminant transport in an airliner cabin mockup [Текст] / Z. Zhang, X. Chen, S. Mazumdar, T. Zhang, Q. Chen // Building and Environment. – 2009. – № 1. – Vol. 44. – P. 85-94.

16. Zhu, X. Experimental and numerical study of flame kernel formation processes of propane-air mixture in a pressurized combustion vessel [Текст] / X. Zhu, L. Sforza, T. Ranadive, A. Zhang, S.-Y. Lee, J. Naber, T. Lucchini, A. Onorati, M. Anbarasu, Y. Zeng // Journal of Engines. – 2016. – № 3. – Vol. 9. – P. 1494-1511.

Мик Иван Александрович, аспирант кафедры инженерных проблем экологии, Новосибирского государственного технического университета, email: mikluha.ia@gmail.com

Горев Василий Николаевич, к.ф.-м.н., доцент кафедры общей физики Физического факультета, Новосибирского национального исследовательского государственного университета, email: vasily.gorev@gmail.com