

# РАСЧЁТ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ФИЛЬТРУЮЩИХ НАНОВОЛОКОН КОМБИНИРОВАННОГО МАТЕРИАЛА

И.А. Мик<sup>1</sup>, В.Н. Горев<sup>2</sup>, В.В. Ларичкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет», г. Новосибирск

Ранее, на основе комбинированного применения методов электроформования и экструзии, был впервые создан и протестирован толстослойный фильтрующий материал с постоянным распределением фильтрующих нановолокон по толщине материала. Однако с точки зрения эксплуатационных характеристик, такой комбинированный материал можно усовершенствовать профилированием распределения фильтрующего нановолокна по толщине материала. Более равномерное распределение загрязнений, улавливаемых в процессе очистки, продлит ресурс эксплуатации фильтрующего элемента. С точки зрения распределения загрязнителя по толщине фильтрующего элемента, оптимальным распределением фильтрующих нановолокон будет то, при котором суммарная масса загрязнителя распределится равномерно по толщине материала. Поэтому задачей данной работы стал расчёт оптимального профиля концентраций фильтрующих нановолокон в каждом слое для выбранного ансамбля загрязнителя, что сделает фильтрующий элемент более емким к загрязнителю. В предыдущей работе была разработана модель фильтрования комбинированного материала, позволяющая по выходным данным из модели (масса осевших частиц) находить входные модельные параметры фильтрующего элемента (длина фильтрующих нановолокон), которые напрямую связаны с технологическими параметрами (расход раствора электроформования). Таким образом, для нахождения оптимальной функции распределения плотности фильтрующих нановолокон решалась обратная задача для модели фильтрования с применением метода наименьших квадратов (МНК). В результате, найдена оптимальная зависимость распределения фильтрующих нановолокон по толщине материала, при которой фильтрующий элемент будет иметь максимальную пылеемкость. Представленные результаты работы подтверждают, что функционально-градиентный подход профилирования комбинированного материала имеет большой потенциал в применении тонкой очистки воздуха.

*Ключевые слова: оптимизация, комбинированный фильтрующий материал, эффективность фильтрации, перепад давления.*

## ВВЕДЕНИЕ

На современном рынке оборудования очистки воздуха существует широкий спектр фильтрующих элементов, по эффективности действия или фильтрующей способности их разделяют на 3 основных класса – фильтрующие элементы грубой очистки воздуха (G1 – G4), фильтрующие элементы тонкой очистки воздуха (F5 – F9) и фильтрующие элементы особо тонкой очистки воздуха (E10 – E12, H13, H14 и U15 – U17) [1]. Фильтрующие элементы грубой очистки используются в помещениях и процессах с низкими требованиями к чистоте воздуха, например, предварительная очистка в системах вентиляции и центрального кондиционирования; при эксплуатации компрессоров, холодильных машин в условиях большой запыленности и т.п. Фильтрующие элементы тонкой очистки воздуха используют в помещениях и процессах с высокими требованиями к чистоте воздуха, например в системах кондиционирования и вентиляции; очистки воздуха газотурбинных агрегатов; в качестве фильтрующих элементов второй ступени очистки (доочистки); в больничных палатах, административных зданиях, гостиницах; при производстве продуктов питания, лекарств; в электронной, мясомолочной промышленности и т.п. Фильтрующие эле-

менты абсолютной очистки применяются для чистых зон, чистых помещений, где предъявляются самые высокие требования к чистоте воздуха, например в фармацевтической и электронной промышленности, в качестве "финишных" фильтрующих элементов, для решения проблем санитарии, гигиены и микроклимата; в лечебных учреждениях, операционных; на АЭС; при производстве некоторых категорий продуктов питания, лекарств и т.п.

Для повышения эффективности тонкой очистки воздуха на основе методов экструзии [2] и электроформования [3] был создан комбинированный метод формования фильтрующего материала. Комбинированный фильтрующий материал представляет собой композицию двух типов волокон: первый тип полипропиленовых (ПП) волокон обеспечивает несущий каркас материала и практически не участвует в процессе фильтрации, второй тип полиамидных (ПА) нановолокон обеспечивает процесс фильтрования. Фильтрующий материал и метод формования подробно описаны в [4].

Согласно известным «вкладам» в механизмы фильтрации для каждого типа волокон, при заданных условиях среды можно прогнозировать характеристики фильтрующего элемента [5, 6]. А значит реально определить наилучшее соотношение длин волокон и

создать оптимальный материал, который по своим свойствам будет стремиться к теоретическому пределу комбинированного метода формирования [4]. Формование оптимальных по структуре фильтрующих элементов позволит создать качественный наукоёмкий продукт при минимальных затратах производства.

Таким образом, задача данной работы произвести расчёт оптимального распределения фильтрующих нановолокон по толщине материала, при котором комбинированный материал будет иметь максимальную пылеемкость.

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

С точки зрения эксплуатационных характеристик комбинированный фильтрующий материал с постоянной плотностью нановолокон можно усовершенствовать профилированием распределения фильтрующего нановолокна по толщине материала фильтрующего элемента. С этой целью на базе созданной физико-математической модели комбинированного фильтрующего материала проводился расчёт оптимального распределения фильтрующих нановолокон по толщине материала. Физико-математическая модель подробно описана в работе [7].

Таким образом, функционально-градиентный фильтрующий материал позволит добиться более равномерного распределения загрязнений, улавливаемых в процессе очистки в объеме фильтрующего элемента. За счёт этого происходит уменьшение скорости роста перепада давления на профилированном фильтрующем материале по сравнению с материалом с равномерным распределением нановолокна при равных условиях эксплуатации. Подход профилирования материала позволит увеличить срок эксплуатации фильтрующего элемента.

Добиться того, чтобы фильтрующие нановолокна были распределены таким образом, что их плотность упаковки в объеме фильтрующего элемента была различна и увеличивалась от входной поверхности фильтрующего элемента, к поверхности фильтрующего элемента, через которую выходит очищенный воздух, можно путём контролируемого изменения скорости осаждения нановолокон. Процесс электроформования [3] волокнистых материалов позволяет достаточно быстро менять свою производительность.

Для каждого типа аэрозоля существует оптимальная функция распределения плотности фильтрующих нановолокон, которая позволит наиболее равномерно осаждавать загрязнения в объеме фильтрующего элемента, что сделает фильтрующий элемент существенно более емким, при прочих равных параметрах процесса фильтрации.

С точки зрения распределения загрязнителя по толщине фильтрующего элемента, оптимальным распределением фильтрующих нановолокон в слое будет то, при котором суммарная масса загрязнителя распределится равномерно по толщине материала. Задача

состоит в нахождении оптимального профиля концентраций фильтрующих нановолокон в каждом слое для выбранного ансамбля загрязнителя. Одним из возможных способов расчёта оптимального распределения фильтрующих нановолокон является нахождение по выходным данным из модели фильтрации (масса осевших частиц) входных модельных параметров фильтрующего элемента (длина фильтрующих нановолокон), которые напрямую связаны с технологическими параметрами (расход ПА раствора электроформования). В этом смысле необходимо решить обратную задачу для представленной выше физико-математической модели. Согласно численной модели [7], загрязнение фильтрующего элемента происходит в одном направлении, плоским фронтом, начиная с первого слоя фильтрующего элемента и заканчивая последним. Другими словами,  $j$ -й слой не зависит от изменений параметров  $j+1$ -го слоя фильтрующего элемента и изменения входного ансамбля концентрации частиц загрязнителя. Такая автономность слоя от следующего позволяет решить обратную задачу с помощью МНК для каждого слоя фильтрующего элемента.

$$L_{ПА}^j = \frac{4tC_{па}Q^j}{N\pi d_{па}^2}, \quad (1)$$

где  $Q^j$  – значения расхода раствора электроформования в  $j$ -м слое;  $L_{па}^j$  – суммарная длина фильтрующих нановолокон зависит от расхода раствора;  $t$  – время формования;  $N$  – количество слоёв материала;  $d_{па}$  – диаметр ПА нановолокон;

$$e_j^2 = \sum_{i=1}^I \left( \frac{M_i E}{N} - m_{ij}(Q^j) \right)^2, \quad (2)$$

где  $M_i$  – суммарная масса ансамбля частиц  $i$ -го загрязнения;  $E$  – заданная интегральная эффективность фильтрующего элемента;  $e_j$  – вектор приближений для  $j$ -го слоя;  $m_{ij}(Q^j)$  – масса частиц в  $j$ -м слое после  $i$ -го загрязнения (зависит от технологического и соответственно модельного параметра);  $I$  – количество загрязнений;

$$e_j^2 \rightarrow \min_{L_{ПА}^j(Q^j)}, \quad (3)$$

Формулы (1 – 3) позволяют найти «оптимальный» вектор  $e$  в смысле максимальной близости векторов стоящих в скобке суммы (см. формулу (2)) и тем самым получить закон, по которому будет меняться технологический параметр при формовании оптимального фильтрующего элемента. Таким образом, обратная задача нахождения оптимального распределения фильтрующих нановолокон по толщине фильтрующего элемента была численно решена на основе физико-математической модели фильтрации с помощью МНК.

На рис. 1 полученное численными методами оптимальное распределение фильтрующих нановолокон в сравнении с линейными и равномерным распределениями.

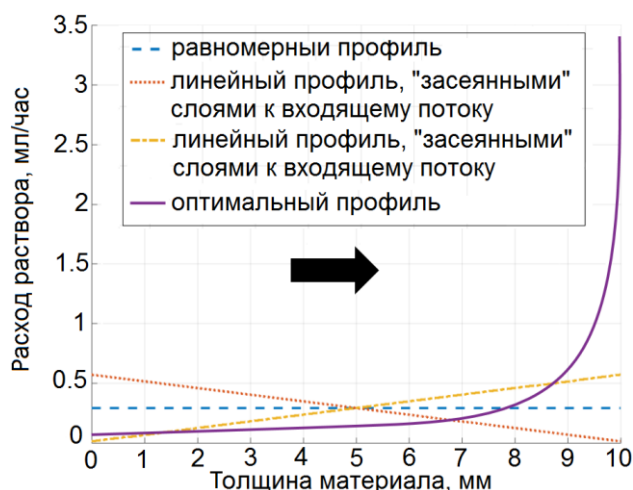


Рис. 1. Распределение фильтрующих ПА нановолокон в комбинированном материале

На рис. 2 эффективность фильтрации от массы загрязнителя на комбинированном материале для различных распределений фильтрующих нановолокон (стрелкой показано направление потока аэрозольных частиц). Видно, что по наиболее проникающим частицам фильтрующий элемент с оптимальным распределением ПА нановолокон выигрывает по эффективности фильтрации.

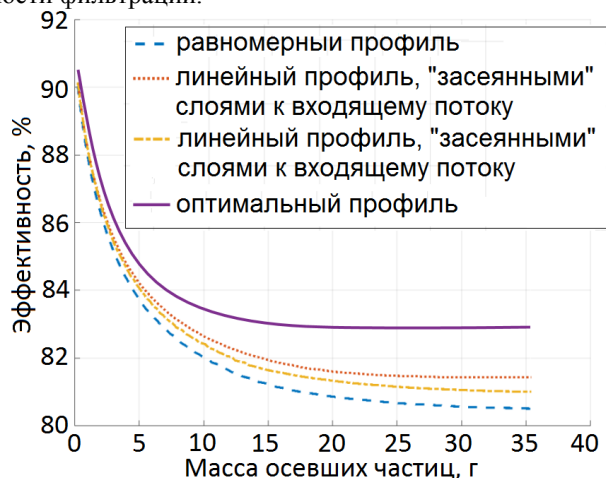


Рис. 2. Эффективность фильтрации от массы загрязнителя на комбинированном материале для различных распределений фильтрующих нановолокон

На рис. 3 перепад давления фильтрующего элемента от массы загрязнителя на материале для различных распределений фильтрующих нановолокон. Комбинированный материал с оптимальным распределением несколько проигрывает в перепаде давления в процессе эксплуатации в сравнении с материалами, имеющими равномерное распределение ПА нановолокон и линейно-профилированным материалом, установленным разреженными слоями к воздушному потоку. По-видимому, эффект связан с тем, что для оптимального в сравнении с остальными вариантами, распределения ПА нановолокон присутствуют слои на порядок большей плотности упаковки. Значитель-

но более резкая неравномерность плотности упаковки по толщине привнесит вклад в эффективность фильтрации по наиболее проникающим частицам, но с другой стороны создаёт дополнительное сопротивление входящему потоку воздуха. Таким образом, положительный вклад по эффективности фильтрации уравнивается вкладом перепада давления, что наглядно отражает рис. 4.

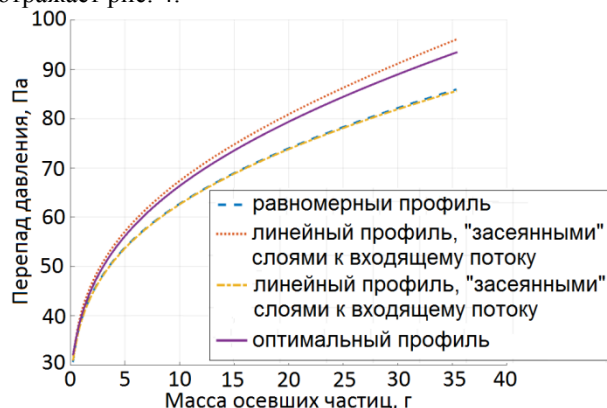


Рис. 3. Перепад давления фильтрующего элемента от массы загрязнителя на комбинированном материале для различных распределений фильтрующих нановолокон

На рис. 4 распределение массы по толщине материала для различных распределений фильтрующих нановолокон (стрелкой показано направление потока аэрозольных частиц).

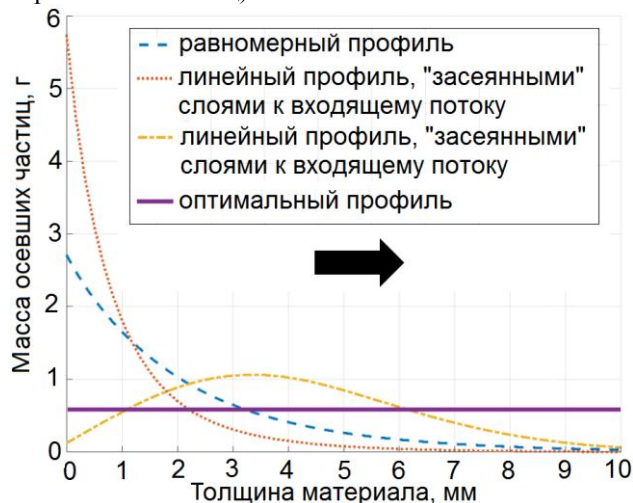


Рис. 4. Масса загрязнителя в слое от толщины комбинированного материала различных распределений фильтрующих нановолокон

На основе численной физико-математической модели, показана целесообразность формирования и использования функционально-градиентного материала.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате численно рассчитана оптимальная зависимость распределения фильтрующих ПА нановолокон по толщине материала, при которой фильт-

рующий элемент будет иметь максимальную пылеёмкость.

Показано, что фильтрующие элементы с оптимальным функционально-градиентным распределением будут иметь значительно большую пылеёмкость при почти равных начальных характеристиках с фильтрующими элементами полученными с равномерным распределением ПА нановолокон. Другими словами, при равных фильтрующих возможностях функционально-градиентный фильтрующий элемент «забьётся» много позже, чем фильтрующий элемент с равномерным распределением фильтрующих нановолокон.

Таким образом, результаты работы подтверждают, что функционально-градиентный подход профилирования комбинированного материала имеет большой потенциал в применении тонкой очистки воздуха.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Уайт, В. Чистые помещения / В. Уайт. – М.: изд. «Клирум», 2008. – 304 с.
2. Tan, D.H. Meltblown fibers: Influence of viscosity and elasticity on diameter distribution [Текст] / D.H. Tan, C. Zhou, C.J. Ellison, S. Kumar, C.W. Macosko, F.S. Bates // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. – 2009. – Vol. 165. – P. 892-900.
3. Persano, L. Industrial upscaling of electrospinning and applications of polymer nanofibers: a review [Текст] / L. Persano, A. Camposeo, C. Tekmen, D. Pisignano // Macromolecular Material and Engineering. – 2013. – Vol. 298. – P. 504-520.
4. Мик, И.А. Метод формования 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.
5. Кириш, А.А. Фильтрация аэрозолей волокнистыми материалами ФП [Текст] / А.А. Кириш, А.К. Будыка, В.А. Кириш // Российский химический журнал. – 2008. – №5. – С. 97-102.
6. Дружинин, Э.А. Производство и свойства фильтрующих материалов Петрянова из ультратонких полимерных волокон / Э.А. Дружинин. – М.: ИздАТ, 2007. – 280 с.
7. Мик, И.А. Моделирование работы гибридного фильтрующего материала [Текст] / И.А. Мик, В.Н. Горев // Ползуновский вестник. – 2018. – №1, – С. 135–142.

*Мик Иван Александрович – аспирант кафедры инженерных проблем экологии, Новосибирский государственный технический университет ФГБОУ ВО НГТУ, тел. (923)1171176, e-mail: mikluha.ia@gmail.com.*

*Горев Василий Николаевич – к.ф.-м.н., доцент кафедры общей физики Физического факультета, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет ФГБОУ ВПО НГТУ, тел. (383)3634445, email: vasily.gorev@gmail.com.*

*Ларичкин Владимир Викторович – д.т.н., заведующий кафедрой инженерных проблем экологии, Новосибирский государственный технический университет ФГБОУ ВО НГТУ, тел. (383)3465031, email: larichkin@craft.nstu.ru.*

# CALCULATION OF THE OPTIMUM PROFILE OF FILTERING NANOFIBERS OF THE COMBINED MEDIA

I.A. Mik<sup>1</sup>, V.N. Gorev<sup>2</sup>, V.V. Larichkin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk

<sup>2</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk

Abstract – Previously, based on the methods of electrospinning and melt-blown, the combined filter media was first developed and tested. However, we can improve such a combined media by profiling the distribution of the filtering fiber over the thickness of the media. In other words, to solve the optimization problem, we must calculate a profile in which the resource of the filter element will be maximized. Therefore, the task of this work is the calculation of the optimal profile of filtering fibers which will make the filter element more capacious to contamination. For this purpose, the inverse problem of least squares filtration model was solved. As a result, the optimal distribution of the filtering nanofibers across the thickness of the media was determined.

Index terms: optimization, combined filter media, filtration efficiency, pressure drop.

## REFERENCES

1. Whyte, W. Chistye pomeshcheniya / W. Whyte. – М.: изд. «Klinrum», 2008. – 304 p.
2. Tan, D.H. Meltblown fibers: Influence of viscosity and elasticity on diameter distribution [Текст] / D.H. Tan, C. Zhou, C.J. Ellison, S. Kumar, C.W. Macosko, F.S. Bates // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. – 2009. – Vol. 165. – P. 892-900.
3. Persano, L. Industrial upscaling of electrospinning and applications of polymer nanofibers: a review [Текст] / L. Persano, A. Camposeo, C. Tekmen, D. Pisignano // Macromolecular Material and Engineering. – 2013. – Vol. 298. – P. 504-520.
4. Mik, I.A. Metod formovaniya vysokoehffektivnogo samonesushchego kompozitnogo fil'truyushchego materiala iz polimernyh mikro- i nanovolokon [Текст] / I.A. Mik, V.N. Gorev, D.A. Trubitsyn // Ehkologiya i promyshlennost' Rossii. – 2017. – Т. 21, № 4. – P. 13–19.
5. Kirsh, A.A. Fil'traciya aehrozolej voloknistymi materialami FP [Текст] / A.A. Kirsh, A.K. Budyka, V.A Kirsh // Rossijskij himicheskij zhurnal. – 2008. – №5. – P. 97-102.
6. Druzhinin, E.A. Proizvodstvo i svoystva fil'truyushchih materialov Petryanova iz ul'tratonkih polimernyh volokon / E.A. Druzhinin. – М.: Izdat, 2007. – 280 P.
7. Mik, I.A. Modelirovanie raboty gibridnogo fil'truyushchego materiala [Текст] / I.A. Mik, V.N. Gorev // Polzunovskij vestnik. – 2018. – №1, – P. 135–142.

Mik Ivan Aleksandrovich – Ph.D. candidate of Engineering Issues in Ecology, Novosibirsk State Technical University, (923)1171176, e-mail: mikuha.ia@gmail.com.

Gorev Vasili Nikolaevich – associate professor of Department of Physics NSU, Novosibirsk State University, (383)3634445, e-mail: vasily.gorev@gmail.com.

Larichkin Vladimir Viktorovich – head of the Department of Engineering Issues in Ecology, Novosibirsk State Technical University, (383)3465031, e-mail: larichkin@craft.nstu.ru.