

УДК 661:51:537.3

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ГАЗОПЫЛЕВЫХ ПОТОКОВ ПОРИСТЫМИ ВОЛОКНОВЫМИ МАТЕРИАЛАМИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ



**М.В. Тумилович**

*Начальник управления подготовки научных кадров высшей квалификации БГУИР, доктор технических наук, доцент*



**Л.П. Пилиневич**

*Профессор кафедры инженерной психологии и эргономики БГУИР, доктор технических наук, профессор*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь  
E-mail: tumilovich@bsuir.by*

**Аннотация.** Проведено теоретическое моделирование и экспериментальное исследование осаждения высокодисперсных частиц из газопылевых потоков (аэрозолей) в пористых волокнистых материалах под воздействием электрического поля. Показано, что использование электрического поля позволяет весьма существенно повысить эффективность осаждения высокодисперсных частиц с размером  $d_p < 0,5$  мкм, особенно наиболее трудноулавливаемых частиц  $d_p \approx 0,3$  мкм. При этом наибольшие ее значения достигаются в случае фильтрации заряженных частиц через заряженные волокна фильтра. Эффективность осаждения повышается с увеличением заряда частиц и волокон, а также плотности их упаковки, удельной поверхности и с уменьшением скорости фильтрации.

**Ключевые слова:** очистка, фильтрация, осаждение, высокодисперсные частицы, моделирование, электрическое поле, эффективность очистки.

Под воздействием природных процессов и в результате деятельности человека происходит интенсивное загрязнение окружающей среды, в том числе воды и воздуха, которое приводит к нежелательному изменению их состава в результате поступления в него различных газопылевых потоков, водяного пара и высокодисперсных частиц аэрозолей и т.д. Такие процессы имеют место, например, при производстве наполнителей и полимеров, порошкообразных пигментов и химикатов, технического углерода, химических средств защиты растений, извести и цемента, пылевидного кварца и асбеста, при плавке цветных и редких металлов. Используемые для очистки газопылевых потоков фильтры чаще всего меняют свои эксплуатационные характеристики при изменении концентрации, физико-химического и дисперсного состава фильтруемых частиц, что приводит к необходимости совершенствования конструкций и оптимизации эксплуатационных параметров фильтрующих аппаратов. И если процесс фильтрации незаряженных высокодисперсных частиц в различных фильтрующих материалах достаточно хорошо изучен экспериментально [1,2], случай очистки заряженных частиц при их относительно высокой степени зарядки в электрическом поле требует отдельного изучения.

Целью данной работы является математическое описание и исследование процесса очистки высокодисперсных частиц газопылевых потоков в пористых волокнистых материалах (ПВМ) под воздействием электрического поля.

Авторами ранее были рассмотрены теоретические аспекты очистки высокодисперсных частиц из газовых потоков в пористых материалах [3,4]. Механизмы осаждения аэрозольных

частиц на отдельном волокне и в общем объеме фильтра из ПВМ при обычных условиях достаточно хорошо изучены и описаны во многих работах (например [5–7]). Эффективность фильтра определяется из основного уравнения фильтрации:

$$\eta = 1 - \exp(-f \eta_f), \quad (1)$$

где:  $\eta_f$  – суммарный коэффициент захвата аэрозольных частиц единичным волокном;  $f$  – параметр фильтрации  $f = 4\alpha z / \pi d_f (1 - \alpha)$ , где  $\alpha$  – плотность упаковки фильтрующего материала,  $z$  – толщина фильтрующего материала.

Эффективность осаждения частиц в фильтре из ПВМ  $\eta$  является функцией многих параметров: радиуса  $r_p$  и плотности  $\rho_p$  улавливаемых частиц, скорости  $V$ , вязкости, температуры  $T$  и давления  $P$  воздуха, наличия внешних сил  $F$ , параметров фильтров (толщины  $z$ , плотности упаковки  $\alpha$ , среднего диаметра волокна  $d_f$  и их дисперсии  $\sigma$ , параметра  $\varepsilon$ , характеризующего внутреннюю структуру фильтра) [7]:

$$\eta = \eta(r_p, \rho_p, V, \mu, T, P, F, z, \alpha, \sigma, \varepsilon) \quad (2)$$

Кроме того, эффективность осаждения зависит от формы частиц, их электрического заряда  $q$  и диэлектрической проницаемости, а также от наличия зарядов на волокнах, диэлектрической проницаемости и формы сечения волокон. Для нестационарного процесса фильтрации, при накоплении осадка на волокнах, эффективность осаждения зависит также от количества осевших частиц и от пористости осадка  $\beta$ .

В общем случае суммарный коэффициент захвата аэрозольных частиц единичным волокном с учетом всех действующих механизмов определяется как:

$$\eta_f = \eta_R + \eta_D + \eta_{DR} + \eta_I + \eta_E \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \eta_D &= 2,7Pe^{-2/3} \{1 + 0,55(k_I)^{-1/3} Pe^{1/3} Kn\} \\ \eta_R &= (2k_I)^{-1} \{ (1 + R)^{-1} - (1 + R) + 2(1 + R) \cdot \\ &\quad \ln(1 + R) + 2,86Kn(2 + R)R(1 + R)^{-1} \} \\ \eta_{DR} &= 1,24(k_I)^{-1/2} Pe^{-1/2} R^{2/3} \\ k_I &= -0,5 \ln \alpha - 0,52 + 0,64\alpha + 1,43(1 - \alpha)Kn \\ \eta_I &= St^2 / (St^3 + 0,77St^2 + 0,22) \\ \eta_E &= 4F_E / 3\pi\mu d_p V, \end{aligned}$$

где:  $\eta_D$  и  $\eta_R$  – коэффициенты захвата, обусловленные диффузионным осаждением частиц и зацеплением, соответственно;  $\eta_{DR}$  – интерференционный член, свидетельствующий о неаддитивности этих двух механизмов осаждения;  $\eta_I$  – коэффициент захвата под действием инерции;  $\eta_E$  – коэффициент захвата под действием электрических сил;  $\mu$  – динамическая вязкость газозоудшного потока;  $\rho$  – плотность среды;  $Kn = \lambda/r_f$  – число Кнудсена,  $\lambda$  – средняя длина свободного пробега молекул воздуха;  $Pe = 2r_f V/D$  – диффузионный параметр Пекле,  $D$  – коэффициент диффузии частиц;  $R = r_p/r_f$  – параметр зацепления;  $St = 2C(Kn)r_p^2\rho V/9\mu r_f$  – инерционный параметр Стокса;  $C(Kn)$  – поправка Каннингема на скольжение газа;  $d_f$  ( $r_f$ ) – диаметр (радиус) волокон,  $d_p$  ( $r_p$ ) – диаметр (радиус) частиц;  $F_E = Qq / \pi\varepsilon_0 d_f$  – сила электрического взаимодействия, когда волокна и частицы заряжены [18];  $F_E = [(\varepsilon_f - 1) / (\varepsilon_f + 1)] \cdot [q^2 / 4\pi\varepsilon_0(2r^*/d_f - 1)^2 d_f^2]$  – сила электрического взаимодействия, когда волокна нейтральны, а частицы заряжены;  $F_E = [(\varepsilon_p - 1) / (\varepsilon_p + 2)] \cdot (Q^2 d_p^3 / \pi\varepsilon_0 d_f^3)$  – сила электрического взаимодействия, когда волокна заряжены, а частицы нейтральны;  $Q$  и  $q$  – заряд волокна и частицы;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная (для воздуха  $8,85 \cdot 10^{-12}$  Кл<sup>2</sup>/Н·м<sup>2</sup>);  $\varepsilon_f$  и  $\varepsilon_p$  –

относительная диэлектрическая проницаемость волокон и частиц;  $r^*$  – расстояние между частицей и волокном.

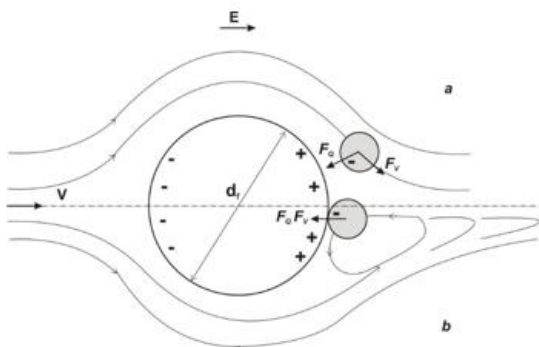
В работе [8] приводится аппроксимационная зависимость для  $\eta_E$ , связывающая инерционный параметр с безразмерным параметром заряда при  $0,5 < Re < 50$ :

$$\eta_E = 1,22(2 - \ln Re) \cdot N_{Qq} / [(St / 2\sqrt{Re})^{1,5} + 1], \quad (4)$$

где:  $Re = d_f V \rho / \mu$  – число Рейнольдса;  $N_{Qq} = Qq / 3\pi^2 \epsilon_0 \mu d_f d_p V$  – безразмерный параметр заряда для случая заряженных частиц и волокон.

Для заряженных частиц размером менее 0,5 мкм и скорости потока более 0,1 м/с доминирующим механизмом осаждения частиц на единичном нейтральном или заряженном волокне является осаждение по действию электрической силы (кулоновского взаимодействия). Вклад остальных механизмов в области субмикронных аэрозолей при высоких скоростях гораздо менее значителен. Но для частиц размером более 1 мкм с повышением скорости потока существенно возрастает роль инерционного механизма осаждения.

На рис. 1 приведена модель осаждения заряженных частиц на единичном волокне, поляризованном в электростатическом поле, при ламинарном и турбулентном режиме обтекания, а на рис. 2 – реальная картина обтекания одиночного цилиндра при высокой скорости потока (число Рейнольдса  $Re=26$  ([9], фото 42)). В данном случае волокно представляет собой диполь, ориентированный в соответствии с направлением силовых линий поля. В процессе движения отрицательно заряженная аэрозольная частица отталкивается от передней одноименно заряженной поверхности волокна и притягивается к противоположно заряженной задней поверхности.



а – ламинарный режим обтекания; б – турбулентный режим обтекания;  $F_Q$  – сила кулоновского притяжения,  $F_V$  – движущая сила,  $V$  – скорость потока

Рисунок 1. Модель осаждения заряженных частиц на поляризованном в электростатическом поле  $E$  на единичном волокне

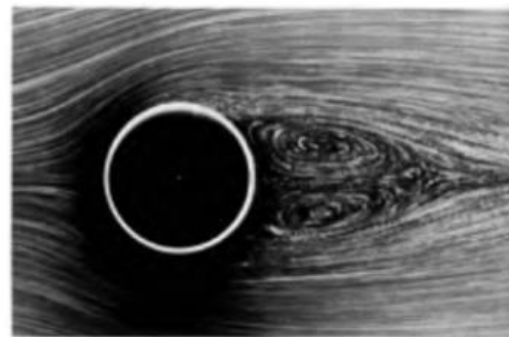


Рисунок 2. Обтекание кругового цилиндра при  $Re=26$  ([6], фото 42)

При ламинарном обтекании потоком среды волокна возможность осаждения частицы будет зависеть от величины ее заряда и, соответственно, силы кулоновского взаимодействия  $F_Q$  а также от скорости потока и, соответственно, движущей силы  $F_V$ . Направления действия сил не совпадают (рис.1,а). С некоторым возрастанием скорости (в пределах ламинарного и переходного режимов обтекания) условия осаждения под действием электрических сил будут ухудшаться. Но будет возрастать значение инерционного механизма осаждения.

При турбулентном обтекании потоком среды волокна, когда за волокном образуется зона циркуляции, условия осаждения частицы улучшаются, поскольку направления действия сил при приближении частицы к волокну благодаря циркуляции вихрей у его поверхности совпадают (рис. 1, б). Таким образом, с ростом скорости условия осаждения улучшаются, но до определенного предела, когда при дальнейшем повышении скорости зона циркуляции растягивается и затем отрывается от поверхности волокна.

При противоположной поляризации волокна, когда на его передней поверхности сосредоточены положительные заряды, создаются благоприятные условия для осаждения частиц на передней поверхности за счет кулоновской силы и эффекта инерции. Но при повышении скорости потока и возрастания движущей силы  $F_V$  эффективность улавливания снижается из-за уноса частиц. Этот случай аналогичен осаждению незаряженных частиц на незаряженных волокнах, но со значительно большей эффективностью улавливания за счет действия кулоновских сил. На обратной стороне волокна осаждения не происходит. Теоретически наиболее благоприятные условия улавливания заряженных аэрозольных частиц создаются при фильтрации через слой униполярно заряженных волокон. Отрицательно заряженная частица может притягиваться ко всей поверхности положительно заряженного волокна. Подобный вариант реализуется в электретенных фильтрах. Однако практически достичь высокого, по сравнению с поляризованными в электростатическом поле волокнами, уровня заряда не представляется возможным. Кроме того, такой заряд не стабилен и со временем в процессе фильтрации снижается вплоть до полного исчезновения.

На рис. 3–5 приведены результаты экспериментальных исследований модели двухзонного аэрозольного электростатического фильтра из ПВМ при фильтрации аэрозоли диоктилфталата (DOP) и естественной пыли в помещении. Исследования проводились при объемных расходах  $Q = 3$  л/мин и  $Q = 15$  л/мин, что соответствовало скоростям потока в фильтре  $V = 0,07$  м/с и  $V = 0,35$  м/с соответственно. Было принято, что чем выше ток коронного разряда, тем больше величина заряда частиц, приобретаемого ими при прохождении зоны зарядки (ионизации).

Анализ полученных результатов показывает, что эффективность фильтра  $\eta$  существенно возрастает с повышением скорости потока и величины зарядки частиц. Фракционная  $\eta_p$  эффективность улавливания также повышается, при этом происходит сдвиг минимума (наиболее проникающих частиц  $d_p \approx 0,3$  мкм) в сторону меньших размеров аэрозольных частиц.

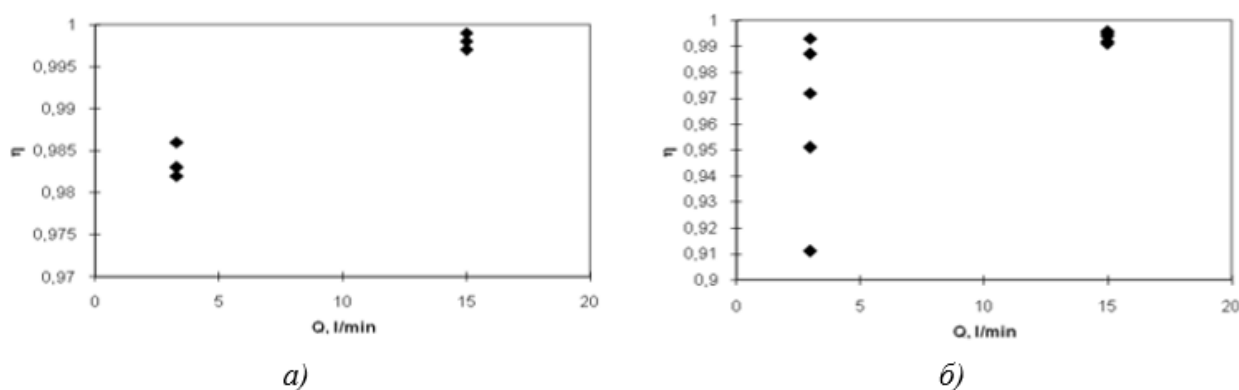


Рисунок 3. Зависимость эффективности улавливания частиц от скорости фильтрации: а – аэрозоль DOP, б – пыль в помещении,  $I_c=50$  мкА

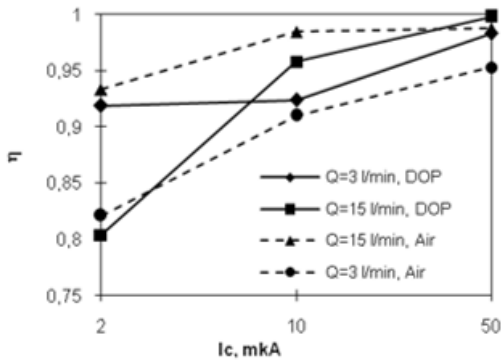


Рисунок 4. Зависимость эффективности улавливания частиц от величины тока короны при различных скоростях фильтрации

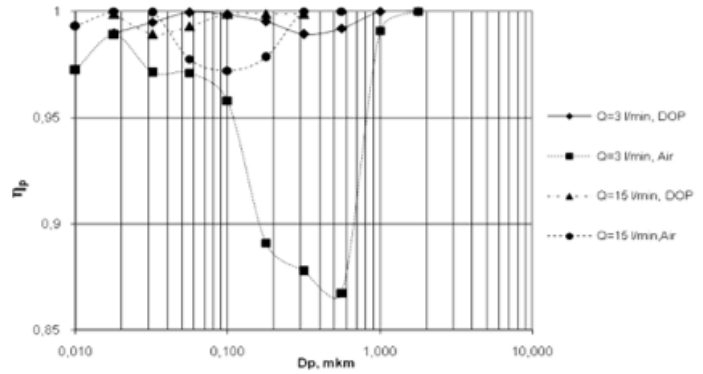


Рисунок 5. Зависимость фракционной эффективности улавливания частиц от скорости потока для различных аэрозолей ( $I_c=50$  мкА)

Результаты проведенных исследований хорошо согласуются с теоретическими расчетами [4] и объясняются тем, что в результате турбулизации потока, вызванной повышением его скорости, улучшаются условия осаждения дисперсных частиц благодаря действию механизма турбулентной диффузии, эффективность которого усиливается за счет увеличения зарядов частиц при повышении тока короны, т.е. усиления электрического взаимодействия между заряженными частицами и поляризованными перемычками ПВМ (фильтроэлемента). Возникающие при обтекании перемычек турбулентные вихри приближают частицы к их поверхности в зону действия электрических сил.

Таким образом, проведенное теоретическое моделирование и экспериментальные исследования показывают, что увеличение скорости потока при определенных условиях приводит к повышению эффективности осаждения аэрозольных частиц на волокнах ПВМ. Эффективность осаждения частиц более 1  $\mu\text{m}$  с увеличением скорости фильтрации возрастает за счет повышения роли инерционного механизма осаждения частиц на передней и частично на обратной поверхности волокон, а при действии электрических сил – на их обратной стороне. Эффективность очистки частиц менее 1  $\mu\text{m}$  с увеличением скорости потока возрастает в случае, когда частицы и волокна заряжены. Турбулизация потока и возникновение циркуляционных вихрей в кормовой области волокон создает благоприятные условия для осаждения частиц на их обратной стороне за счет турбулентной диффузии и совпадения направления действия движущей силы потока и силы кулоновского взаимодействия заряженных частиц и заряженных (поляризованных в электрическом поле) волокон. В результате появляется возможность существенно повысить производительность фильтрации, а также общую и фракционную эффективность улавливания аэрозольных частиц, и, что особенно важно, в области наиболее проникающих частиц размером около 0,3  $\mu\text{m}$ . При этом, в качестве фильтрующего материала могут использоваться относительно крупные волокна в диапазоне 30 – 100  $\mu\text{m}$ , что значительно дешевле и технически проще по сравнению с наноразмерными волокнами, получение которых вызывает определенные технологические трудности и в промышленных объемах еще не освоено.

#### Список литературы

- [1]. Shaddon, R.W.L. Electrically enhanced collection of reparable aerosols in granular bed filters at low Reynolds number/ R.W.L. Shaddon //IEEE Trans. Ind. appl. – 1985. – V.21. – N 2. – P. 501–506.
- [2]. Wang, C. Dust collection by particle inertia and electrical forces/ C. Wang, HOC// Powder Techn. Pap. Int. Symp. – Kyoto. –1981. – P. 565–72.
- [3]. Тумилович, М.В. Исследование закономерностей коагуляции высокодисперсных частиц из

газовых потоков в пористых материалах/ М.В. Тумилович, Л.П. Пилиневич, В.И. Байков [и др.]// Наука и техника. – 2012.– №1. –с.67–74.

[4]. Тумилович, М.В. Влияние скорости потока и электрических сил на эффективность фильтрации ультрадисперсных аэрозолей / М.В. Тумилович, Л.П. Пилиневич, А.Е. Галкин// Вестник БНТУ. –№5. – 2010. – С.54–60.

[5]. Тумилович, М.В. Исследование закономерностей коагуляции высокодисперсных частиц в пористых волоконных материалах в электрическом поле / М.В. Тумилович, Л.П. Пилиневич, В.И. Байков [и др.]// Наука и техника. – 2012.– №5. –с.3–7.

[6]. Тумилович, М. В. Моделирование процесса очистки газопылевых потоков в волоконных фильтрах / М. В. Тумилович, Л. П. Пилиневич // BIG DATA and Advanced Analytics: collection of materials of the third international scientific and practical conference. (Minsk, Belarus, May 3 – 4, 2017) / editorial board : M. Batura [etc.]. – Minsk : BSUIR, 2017. – С. 184 – 191.

[7]. Кирш, А. А. Фильтрация аэрозолей волокнистыми материалами ФП / А. А. Кирш, А. К. Будыка, В. А. Кирш // Российский химический журнал. – 2008. – Т. LI. – № 5.- С. 268-273.

[8]. Muhr, W. Theoretische und experimentelle untersuchung der partikelabscheidung in faserfiltern durch feld- und trägheitskräfte. Dissertation / W. Muhr. – Universität Karlsruhe, 1976. – S. 145–153.

[9]. Альбом течений жидкости и газа: А56 Пер. с англ./Сост. М. Ван-Дайк. –Москва: Мир, 1986. – 184 с.

## MATHEMATICAL DESCRIPTION AND INVESTIGATION OF THE PROCESS OF CLEANING GAS-POLYMER FLOWS WITH POROUS FIBER MATERIALS UNDER THE ACTION OF THE ELECTRIC FIELD

**M.V. TUMILOVICH,**  
*Doctor of Engineering Sciences*  
*Head of department of preparation*  
*of scientific shots of the top skills of*  
*BSUIR, Associate professor*

**L.P. PILINEVICH,**  
*Doctor of Engineering Sciences*  
*Professor of department of engi-*  
*neering psychology and ergonom-*  
*ics of BSUIR, professor*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus*  
*E-mail: tumilovich@bsuir.by*

**Abstract.** Theoretical modeling and experimental investigation of the deposition of highly dispersed particles from gas-dust flows (aerosols) in porous fiber materials under the influence of an electric field is carried out. It is shown that the use of an electric field makes it possible to substantially increase the deposition efficiency of highly dispersed particles with a size  $d_p < 0.5 \mu\text{m}$ , especially the most difficult-to-capture particles  $d_p \approx 0.3 \mu\text{m}$ . At the same time, its greatest values are achieved in the case of filtering charged particles through charged filter fibers. The efficiency of precipitation increases with increasing charge of particles and fibers, as well as the density of their packaging, the specific surface and with a decrease in the rate of filtration.

**Key words:** cleaning, filtration, precipitation, highly dispersed particles, modeling, electric field, cleaning efficiency.