

Фильтрующие материалы, аэрозоли

УДК: 541.182.213:621.928.95

Фильтрация аэрозолей волокнистыми материалами ФП

А. А. Кирш, А. К. Будыка, В. А. Кирш

АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ КИРШ — доктор химических наук, заведующий лабораторией дисперсных систем РНЦ «Курчатовский институт». Область научных интересов: физикохимия субмикронных аэрозолей.

*123182 Москва, пл. Курчатова, 1, РНЦ «Курчатовский институт», тел. (499)196-76-35,
E-mail akirsch@mail.ru*

АЛЕКСАНДР КОНСТАНТИНОВИЧ БУДЫКА — доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией аэрозолей, заместитель генерального директора по научной работе ФГУП «НИФХИ им. Л.Я. Карпова». Область научных интересов: методы улавливания и контроля аэрозолей.

*105064 Москва, ул. Воронцово поле, 10, НИФХИ им. Л.Я. Карпова, тел. (495)916-67-93,
E-mail budyka@cc.nifhi.ac.ru*

ВАСИЛИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ КИРШ — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физикохимии коллоидных систем Института физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН. Область научных интересов: фильтрация аэрозолей.

119991 Москва, Ленинский просп., 31, Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина, тел. (495)955-46-47, E-mail science2003@yandex.ru

В тридцатые годы прошлого столетия сотрудники лаборатории аэрозолей НИФХИ им. Л.Я. Карпова И.В. Петрянов, Н.Д. Розенблюм и Н.А. Фукс при попытке получить монодисперсные аэрозоли из раствора нитрата целлюлозы методом электростатического распыления обнаружили, что вместо капелек формируются очень тонкие протяженные волокна, которые образуют однородные волокнистые слои (получившие в конце сороковых годов название «материалы ФП» — фильтры Петрянова). На протяжении более 50 лет фильтрующие материалы ФП были единственным средством в нашей стране, обеспечивающим тонкую очистку воздуха от взвешенных субмикронных частиц. Подробная информация о фильтрующих свойствах и о применении фильтров ФП впервые была опубликована в брошюре И.В. Петрянова с соавт. только в 1968 году [1]. Впоследствии его ученики опубликовали ряд монографий [2, 3].

За рубежом подход к получению волокон методом электроспиннинга (электроформование) независимо развивался также с тридцатых годов прошлого столетия. Но для целей фильтрации использовали фильтрующие материалы на основе минеральных волокон.

Бурное возрождение электроспиннинга началось с 1995 года. В многочисленных публикациях по электроспиннингу наибольшее внимание уделяется его приложениям в области медицины и тканевой инженерии: разработка защитных покрытий из биоразлагаемых полимеров, средств доставки лекарственных препаратов, в том числе для восстановления поврежденных тканей. Другое направление связано с разработкой нанокпозиционных материалов, обладающих уникальными свойствами. Метод отличается простотой, высокой производительностью и позволяет в одну стадию получить готовый материал. В настоящее время электроспиннинг является наиболее эффективным методом получения непрерывных полимерных волокон с диаметрами в диапазоне от нескольких нм до нескольких мкм. Нановолокна, полученные методом электроспиннинга, используются в катализе, для разработки эффективных источников энергии и новых сенсоров газов и жидкостей, для создания теплозащитных тканей и в ряде других областей.

Основные достижения в области получения микро- и нановолокон методом электроспиннинга представлены в обзорах [4—6]. Однако сведения о фильтрации газов электроспиннинговыми нановолокнистыми материала-

ми в литературе практически отсутствуют. Первые количественные данные по осаждению аэрозольных частиц на нановолокнах были представлены на Десятом всемирном фильтрационном конгрессе (2008 г.) [7].

Несмотря на разнообразие применения, большая часть производимых в стране материалов ФП используется в качестве аэрозольных фильтров для промышленной очистки воздуха и газов, для защиты органов дыхания, в качестве средств анализа запыленности воздуха. Из всех фильтрующих пористых перегородок, пригодных для улавливания взвешенных субмикронных частиц, тонковолокнистые материалы обладают наибольшей эффективностью при одинаковом сопротивлении потоку или, другими словами, при заданной эффективности улавливания волокнистые материалы имеют существенно более низкое сопротивление. Электроспиннинговые фильтрующие материалы типа ФП имеют еще более высокую эффективность улавливания частиц, что обусловлено наличием электрического заряда на волокнах, под действием которого двигающиеся в потоке около волокна взвешенные частицы поляризуются и притягиваются к поверхности волокна. Заряды на волокнах генерируются в процессе их получения и могут долго сохраняться благодаря шероховатости волокон, гидрофобности их поверхности и высокому омическому сопротивлению полимеров, из которых они изготавливаются.

Характерной особенностью промышленных материалов ФП является монодисперсность и гантелеобразное сечение волокон. Промышленные фильтры на основе ФП не подвержены образованию трещин, например при тряске, как все другие типы НЕРА (high efficiency particulate air) фильтров, что позволило упростить технологию их изготовления — не требуется уплотняющих герметиков. Вместе с тем серьезным недостатком этих фильтров на первом этапе их применения явилось снижение эффективности улавливания частиц при попадании на фильтрующий материал капель воды или масел, особенно растворителей. К настоящему времени подобраны полимеры для изготовления фильтров ФП, которые устойчивы к любым воздействиям, в том числе и к капельной влаге и повышенным температурам [8]. Ввиду длительного срока эксплуатации промышленных фильтров на основе ФП их параметры (диаметр волокна, плотность упаковки и толщина) рассчитываются для заданных условий фильтрации, исходя из фильтрующих характеристик разряженных материалов, поскольку в процессе фильтрации воздуха заряды на волокнах могут нейтрализоваться через несколько дней.

Выдающимся достижением в области обеспечения защиты органов дыхания от взвешенных субмикронных частиц явилось создание в НИФХИ им. Л.Я. Карпова высокоэффективного бесклапанного респиратора из фильтрующего материала ФП [9]. Именно в этом изделии в полной мере реализовалось уникальное свойство этих материалов — наличие высоких зарядов на волокнах, обеспечивающих высокую эффективность улавливания сравнительно тонким слоем волокон, сопротивление которого при заданной эффективности улавливания

частиц существенно ниже, чем любого другого фильтрующего материала. Для данного респиратора совпадают срок его использования и продолжительность нейтрализации зарядов на волокнах. За период более полувека было изготовлено свыше 5 млрд респираторов, предназначенных для применения на опасных и вредных производствах, прежде всего, в атомной промышленности.

Для достижения тонкого пылеулавливания необходим фильтрующий материал, обеспечивающий заданную эффективность улавливания частиц при минимальном сопротивлении потоку. Сопротивление фильтра характеризуется перепадом давления на фильтре Δp , отнесенным к скорости течения U и к динамической вязкости воздуха μ :

$$\Delta p/U\mu = LF \quad (1)$$

где L — длина волокон, приходящихся на единицу площади фильтрующего материала; $L = \alpha H/\pi a^2$; α — плотность упаковки фильтра; H — толщина; a — радиус волокон; F — безразмерная сила сопротивления, действующая на единицу длины волокна.

Процесс осаждения частиц на волокне характеризуется коэффициентом захвата η , который зависит от параметров фильтра, условий течения газа в фильтре и от размера частиц. Коэффициент захвата — безразмерная скорость осаждения частиц, отнесенная к единице длины волокна в фильтре, связан с эффективностью фильтра E соотношением:

$$E = 1 - N/N_0 = 1 - \exp(-2aL\eta) \quad (2)$$

где N_0, N — концентрация частиц до фильтра и за ним.

Для сравнения начальных характеристик фильтров используется критерий качества — отношение логарифма проскока частиц к перепаду давления:

$$\gamma = -\ln N/N_0/(\Delta p/U\mu)$$

Основная задача теории фильтрации — расчет коэффициента захвата η волокном частиц, который является функцией многих параметров: радиуса r_p и плотности ρ улавливаемых частиц, скорости, вязкости, температуры T и давления p воздуха, наличия внешних сил F , параметров фильтров (толщины, плотности упаковки, среднего диаметра волокна $2a$ и их дисперсии σ , параметра ϵ , характеризующего внутреннюю структуру фильтра)

$$\eta = \eta(r_p, \rho, U, \mu, T, p, F, a, \alpha, \sigma, \epsilon)$$

Кроме того, коэффициент захвата 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, коэффициент захвата зависит также от количества осевших частиц и от пористости осадка β . С учетом различных механизмов осаждения частиц задача определения эффективности фильтра сводится к расчету коэффициента захвата в зависимости от параметров фильтра и безразмерных параметров, характеризующих условия фильтрации:

$$\eta = \eta(Re, Kn, Pe, R, St, G \dots)$$

где $Re = 2aU/\nu$ — число Рейнольдса; ν — кинематическая вязкость газо-воздушного потока; $Kn = \lambda/a$ — число Кнудсена; λ — средняя длина свободного пробега молекулярных частиц воздуха; $Pe = 2aU/D$ — диффузионный параметр Пекле; D — коэффициент диффузии частиц; $R = r_p/a$ — параметр зацепления; $St = 2C(Kn)r_p^2\rho U/9\mu a$ — инерционный параметр Стокса; $C(Kn)$ — поправка Каннингема на скольжение газа; $G = U_G/U$ — седиментационный параметр; U_G — скорость оседания частиц.

Трудность при исследовании процесса фильтрации аэрозолей связана с необходимостью одновременного учета большого числа параметров. Кроме того заметим, что кривая зависимости проскока частиц через фильтр от их радиуса при фиксированной скорости потока проходит через максимум. Радиус частиц, соответствующий максимуму проскока, называется радиусом наиболее проникающих частиц. Величина проскока в области максимума проскока или соответствующая величина минимума эффективности улавливания наиболее проникающих частиц (формула 2) при заданной скорости является характеристикой фильтра. (Испытания фильтров проводятся по наиболее проникающим частицам.) Радиус наиболее проникающих частиц зависит от многих параметров, таких как скорость течения газа через фильтр, радиус волокон и др. Определение радиуса наиболее проникающих частиц для заданных условий и заданных параметров фильтра — наиболее трудная задача. Это связано с тем, что захват частиц осуществляется по нескольким неаддитивным механизмам, причем вклады этих механизмов в данном случае невелики и соизмеримы по величине. Расчет фильтров из электроспиннинговых волокон еще более сложен из-за неопределенности распределения зарядов на волокнах по толщине фильтра и из-за некруговой формы сечения волокон.

Осаждение аэрозольных частиц происходит из тонкого слоя газа, прилегающего к волокну фильтра, поэтому для расчета процесса улавливания частиц необходимо точное знание поля течения аэрозоля непосредственно около поверхности волокна. Первые расчеты по осаждению частиц на волокнах фильтра были выполнены на основе поля течения около изолированного цилиндра [13]. Результаты позволили качественно объяснить процесс улавливания частиц в фильтрах. Однако количественного соответствия теоретических расчетов с экспериментальными данными получено не было. Это можно объяснить тем, что в расчетах не принималось во внимание два фактора: во-первых, поле течения около отдельного волокна зависит от числа Рейнольдса, в то время как поле течения в фильтре от Re не зависит и, во-вторых, сказывается влияние соседних волокон. Измеренные значения силы, действующей на волокно, F и коэффициента захвата η для разных фильтров, различаются в несколько раз при прочих фиксированных параметрах фильтров и одинаковых условиях фильтрации [10]. Причина этой неоднозначности связана с не-

однородностью структуры, которая обусловлена различной степенью диспергирования волокон в процессе изготовления всех типов фильтров, за исключением ФП, флуктуациями пористости и толщины фильтров. Ввиду сложности микроструктуры волокнистых фильтров и, следовательно, сложного характера течения в них, при разработке теории фильтрации процесс изучали на моделях волокнистых фильтров, свойства которых наиболее совпадают со свойствами реальных фильтров. В качестве таких моделей рассматривались системы параллельных волокон, ориентированные перпендикулярно направлению потока.

Существенный вклад в развитие теории фильтрации внесли отечественные ученые и прежде всего из Карповского института: Н.А. Фукс [11] и И.В. Петрянов [12]. Большое значение для развития теории имели работы Г.Л. Натансона [14—16]. В 60-х годах прошлого столетия Н.А. Фукс совместно с И.Б. Стечкиной и А.А. Киршем опубликовали результаты моделирования и расчета волокнистых фильтров, которые легли в основу методов расчета фильтров тонкой очистки воздуха [17—19]. К настоящему времени наметился прогресс в понимании процессов улавливания частиц, что позволяет решать некоторые практические задачи, включая нахождение оптимальных параметров фильтров и выбор условий их испытаний. Этапы развития теории фильтрации аэрозолей довольно полно отражены в [20, 21].

Волокнистые фильтры, получаемые методом электроспиннинга, обладают еще одним замечательным свойством, помимо указанных выше. Заряды на волокнах в процессе их получения обеспечивают однородность структуры материалов не только по площади материала ФП, но и однородность внутренней структуры, поскольку заряды предотвращают образование жгутов. Ввиду однородности структуры фильтрующих материалов ФП оказалось возможным для расчета их эффективности применить теорию фильтрации, развитую для модельного, так называемого веерного трехмерного фильтра, состоящего из рядов параллельных волокон с круговым сечением, где плоскость каждого ряда повернута на произвольный угол [10]. Проскок субмикронных частиц радиусом r_p через фильтр, состоящий из незаряженных монодисперсных волокон кругового сечения, для которого измерен перепад давления Δp , оценивается следующим образом:

$$\frac{N}{N_0} = \exp\left[-\frac{2a\eta^f \Delta p}{U\mu F^f}\right] \quad (3)$$

$$\eta^f = \eta_R + \eta_D + \eta_{DR} \quad (4)$$

$$\eta_D = 2,7Pe^{-2/3}\{1 + 0,55(k_1)^{-1/3}Pe^{1/3}Kn\} \quad (5)$$

$$\eta_R = (2k_1)^{-1}\{(1+R)^{-1} - (1+R) + 2(1+R)\ln(1+R) + 2,86Kn(2+R)R(1+R)^{-1}\} \quad (6)$$

$$\eta_{DR} = 1,24(k_1)^{-1/2}Pe^{-1/2}R^{2/3} \quad (7)$$

$$k_1 = -0,5\ln\alpha - 0,52 + 0,64\alpha + 1,43(1-\alpha)Kn \quad (8)$$

$$F = 4\pi/k_1 \quad (9)$$

где η^f — суммарный коэффициент захвата; η_D и η_R — коэффициент захвата, обусловленный диффузионным осаждением частиц и зацеплением, соответственно; η_{DR} — интерференционный член, свидетельствующий о неаддитивности этих двух механизмов осаждения.

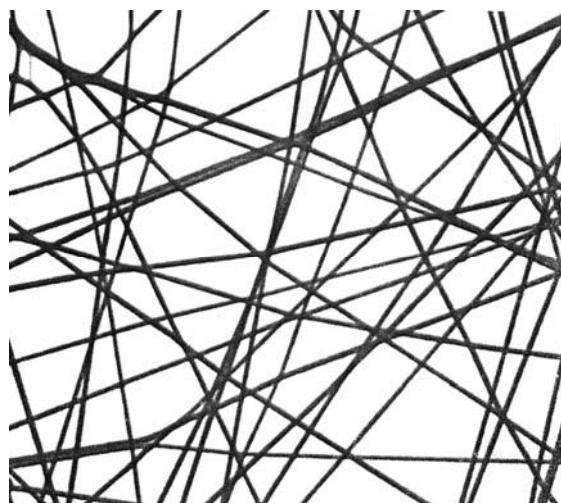
Расчеты по формулам (3) — (9) позволяют оценивать проскок в области максимума. Здесь не учитывается инерционный механизм осаждения частиц, поскольку тонкая фильтрация осуществляется вообще при малой скорости течения газа через фильтр. Не учитываются также заряды на волокнах, поскольку, как отмечалось, при выборе фильтра для промышленной фильтрации следует руководствоваться данными испытаний по наиболее проникающим частицам, соответствующим минимальной эффективности, т.е. наихудшим условиям улавливания частиц. К сожалению, как отмечалось выше, через несколько дней непрерывной эксплуатации фильтров заряды на волокнах нейтрализуются. Заряды стекают тем быстрее, чем выше влажность прокачиваемого воздуха.

Применимость веерной модели к расчету фильтров ФП установлена в прецизионных экспериментальных работах Е.Н. Ушаковой с соавт. [22]. В этих работах для некруговых волокон ФП находили эффективный гидродинамический радиус a_e , равный радиусу круговых волокон, который определяли по измеренному перепаду давления Δp по формуле (1) для фильтра, имеющего такие же, как и у реального фильтра, плотность упаковки и толщину. С помощью определенного таким образом радиуса волокон авторы рассчитали эффективность осаждения частиц в фильтрах ФП не только по механизму зацепления, но и по диффузионному механизму. Заметим, однако, что радиус a_e не может быть использован для расчета процесса осаждения частиц по другим механизмам, например, для инерционных частиц. Кроме того, по данным электронно-микроскопических измерений площади и формы сечения некруговых волокон нельзя решить прямую задачу — определение перепада давления даже при известных значениях величин α и H , поскольку неизвестна сила сопротивления таких волокон. Только недавно нам удалось рассчитать эту силу, в том числе с учетом скольжения газа около волокон [23, 24]. Осаждение частиц в фильтрах ФП в инерционном режиме исследовалось в работе [25].

При изучении влияния зарядов волокон на улавливание частиц с помощью материалов ФП [26] было показано, что их эффективность во много раз превышает эффективность материалов ФП, подвергнутых длительному облучению, т.е. когда с волокон гарантированно удалены заряды, хотя образцы материалов в том и другом случае электронейтральны. (Опыты с цилиндром Фарадея показали, что кусочки фильтров с заряженными волокнами в целом нейтральны [27].) Эффективность улавливания безынерционных незаряженных частиц в отсутствие диффузионного осаждения повышается с ростом размера частиц и с уменьшением скорости потока, что соответствует теоретическим представлениям об осаждении незаряженных частиц на заряженное волокно.

Строгое сравнение результатов измерения осаждения частиц на заряженных материалах ФП с расчетом пока не представляется возможным, поскольку до сих пор не выяснено распределение зарядов в толще материала. Высказано предположение, что в фильтре заряды сохраняются только на первом и последнем слоях, а в середине слоя волокна могут быть разряжены [27]. Но как в таком случае объяснить, почему при хранении фильтров длительное время материал ФП не разряжается? Неопределенность распределения зарядов в слое волокон затрудняет выбор адекватной модели заряженного фильтра. Эта задача актуальна в рамках решения проблемы сохранения зарядов, особенно в многослойных фильтрующих материалах, слои которых состоят из волокон разного диаметра. Вполне вероятно, что заряженные волокна ФП по своей природе аналогичны электретным волокнам. Отметим, что заряды на волокнах ФП в большей степени влияют на осаждение заряженных частиц. Все возможные механизмы электростатического осаждения частиц без учета других эффектов рассмотрены в [15]. Осаждению заряженных субмикронных частиц на незаряженное волокно с учетом диффузионного механизма осаждения посвящена работа [28].

Работы в области электроспиннинга полимерных волокон, проводимые в НИФХИ им. Л.Я. Карпова, привели к созданию технологии получения ФП из нановолокон (см. рис.). По этой технологии тонкая струя расплава полимера, имеющая гантельное сечение и высокую плотность поверхностного заряда расщепляется на две примерно одинаковые струйки, из которых после высыхания образуются круговые монодисперсные нановолокна. Для достижения высокого технологического результата подбираются полимеры с определенными свойствами, концентрации полимеров в соответствующих растворителях, расход растворов, потенциал распыления и расстояние до заземленного коллектора, концентрации паров растворителей в обдувочных струях. Часть получаемых нановолокон в слое сохраняет



Нановолокна (диаметр 0,12 мкм), полученные электроформованием из раствора фторполимера

параллельность после расщепления струи раствора полимера, т.е. некоторые пары не успевают разлететься под действием одноименных зарядов. Иногда в слое остается небольшая часть нерасщепленных волокон.

Особенности гидродинамического поля течения и диффузионного осаждения наночастиц в фильтрующем слое из нановолокон, связанные с наличием в слое сдвоенных нановолокон или пар параллельных волокон, исследованы с учетом эффекта скольжения газа [23, 24]. Модельный фильтр представлял собой периодический ряд сдвоенных параллельных волокон; поток аэрозоля поступает перпендикулярно слою волокон. Рассчитаны поле течения и процесс осаждения наночастиц в этом фильтре в зависимости от расстояния между парами волокон, расстояния между волокнами в паре, ориентации пар волокон относительно направления потока и соотношения диаметров волокон в паре. Численным решением уравнений течения вязкой несжимаемой жидкости в приближении Стокса определены поле скоростей и действующие на волокна силы сопротивления, а затем по уравнению конвективной диффузии рассчитаны коэффициенты диффузионного захвата. Показано, что в разреженном ряду волокон при попарном сближении их до соприкосновения сила сопротивления волокна уменьшается вдвое. Этот результат согласуется с экспериментальными данными для модельных фильтров и с аналитическим решением уравнений Стокса при стесненном обтекании пар одинаковых волокон в разреженном ряду. С учетом этих данных при расчете по формулам (4)—(8) эффективности фильтров из монодисперсных нановолокон, для которых существен эффект скольжения газа, нет необходимости находить эффективный радиус a_e , а можно непосредственно находить истинный радиус нановолокон. Поскольку для слоя волокон микрометровой толщины трудно определить длину волокон L , то удобно воспользоваться поправкой на скольжение в формуле (8) для гидродинамического фактора и по двум значениям перепада давления, измеренным при двух разных абсолютных давлениях при известном расходе газа, оценить истинный радиус a .

Истинный радиус волокон является основным параметром незаряженного фильтра. При уменьшении радиуса волокна увеличивается коэффициент захвата, снижается перепад давления и, следовательно, увеличивается критерий качества фильтра. Ввиду малой механической прочности нановолокон при изготовлении из них фильтров они наносятся на пористую проницаемую подложку, в качестве которой используется такой же волокнистый листовой материал из более толстых волокон. Получаемые фильтрующие материалы обладают более высокой эффективностью улавливания субмикронных аэрозольных частиц при одинаковом сопротивлении потоку по сравнению с традиционными фильтрами, не имеющими слоев из нановолокон.

Развитие получили работы в области технологии изготовления из нановолокон бикомпонентных фильтров, состоящих из двух различных по диаметру и материалу волокон. Такие фильтры формируются при одно-

временном электроспиннинге волокон из разных растворов и при разных режимах, при этом нановолокна наносятся на одну подложку. Эксперименты и расчеты показывают, что фильтры такой структуры обладают высокой эффективностью улавливания субмикронных и наноразмерных частиц и имеют большой срок службы до достижения заданной величины перепада давления (при забивке их твердыми частицами). Большой ресурс таких фильтров по сравнению с однокомпонентными или слоистыми фильтрами обусловлен тем, что при улавливании частиц осуществляется объемная, а не поверхностная фильтрация.

В заключение заметим, что возможности получения непрерывных нано- и микроволокон методом электроспиннинга для фильтров тонкой очистки газов еще не исчерпаны. С помощью этого метода предстоит решить очередную задачу интенсификации процесса фильтрации, а именно, подобрать условия для получения наноусов на нано- и микроволокнах, которые значительно увеличат критерий качества фильтрующих материалов [29].

* * *

Работа выполнена при финансовой поддержке Роснауки (ГК 02.513.11.3165).

ЛИТЕРАТУРА

1. Петрянов И.В., Козлов В.И., Басманов П.И., Огородников Б.И. Волокнистые фильтрующие материалы ФП. М.: Химия, 1968, 79 с.
2. Басманов П.И., Кириченко В.Н., Филатов Ю.Н., Юров Ю.Л. Высокоэффективная очистка газов от аэрозолей фильтрами Петрянова. М.: Наука, 2003, 271 с.
3. Filatov Y., Budyka A., Kirichenko V. Electrospinning of micro- and nanofibers. N.Y.: Begell House, Inc. Publishers, 2007, 404 p.
4. Huang Zheng-Ming, Zhang Y.-Z., Kotaki M., Ramakrishna S. Composites Science and Technology, 2003, № 63, p. 2223—2253.
5. Chronakis I.S. J. Materials Processing Technology, 2005, v. 167, № 2—3, p. 283—293.
6. Kim B.C., Nair S., Kim J. Nanotechnology, 2005, v. 16, p. 382—388.
7. Wang J., Kim S.C., Pui D.Y.H. Proc. 10th World Filtration Congress, April 14—18, 2008, Leipzig, Germany, v. 3, p. 161—165.
8. Рогинская Ю.Е., Рыкунов В.А., Ушакова Е.Н., Шепелев А.Д. Шестые Петряновские чтения, Москва, 19—21 июня 2007 г., с. 43—44.
9. Петрянов И.В., Кощев В.С. и др. «Лепесток» (легкие респираторы). М.: Наука, 1984.
10. Kirsch A.A., Stechkina I.B. In «Fundamentals of Aerosol Science». Ed. D.T. Shaw. N.Y.: Wiley, 1978, p. 165—256.
11. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М.: Изд. АН СССР, 1955.
12. Петрянов-Соколов И.В. Избранные труды. М.: Наука, 2007, 452 с.
13. Langmuir I. OSRD Report № 865, 1942.
14. Натансон Г.Л. Докл. АН СССР, 1957, т. 112, № 1, с. 100—103.
15. Натансон Г.Л. Там же, 1957, т. 112, № 4, с. 696—699.
16. Натансон Г.Л. Коллоидный ж., 1960, т. 24, № 1, с. 52—54.

17. *Стечкина И.Б., Фукс Н.А.* Там же, 1967, т. 29, № 2, с. 260—265.
18. *Кири А.А., Фукс Н.А.* Там же, 1967, т. 29, № 5, с. 682—686.
19. *Кири А.А., Фукс Н.А.* Там же, 1968, т. 30, № 6, с. 836—841.
20. *Davies C.N.* Air Filtration. N.Y.: Academic Press, 1973.
21. *Brown R.C.* Aerosol Filtration. Oxford: Pergamon Press, 1993, p. 269.
22. *Ушакова Е.Н., Козлов В.И., Петрянов И.В.* Коллоидный ж., 1973, т. 35, № 1, с. 99—104; № 2, с. 388—391; № 5, с. 993—995.
23. *Кири В.А., Будыка А.К., Кири А.А.* Там же, 2008, т. 70, № 5, с. 620-629
24. *Кири В.А., Будыка А.К., Кири А.А.* Там же, 2008, т. 70, № 5, с. 630-634
25. *Будыка А.К., Огородников Б.И., Скитович В.И., Петрянов И.В.* Докл. АН СССР, 1985, т. 284, № 5, с. 1160—1163.
26. *Ушакова Е.Н., Абрамина Е.В., Козлов В.И., Петрянов И.В.* Коллоидный ж., 1977, т. 37, № 3, с. 602—605.
27. *Попов С.И., Петрянов И.В.* Докл. АН СССР, 1975, т. 225, № 4, с. 868—870.
28. *Kirsch V.A., Budyka A.K.* Proc. 10th World Filtration Congress. April 14—18, 2008, Leipzig, Germany, v. 3, p. 461—465.
29. *Кири В.А.* Коллоидный ж., 1996, т. 58, № 6, с. 786—791.