

УЛАВЛИВАНИЕ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ ФИЛЬТРАМИ ИЗ ВОЛОКОН, ПОКРЫТЫХ ПОРИСТЫМИ ПРОНИЦАЕМЫМИ ОБОЛОЧКАМИ

© 2019 г. А. А. Кириш^{1, *}, В. А. Кириш^{1, 2}

¹Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”
пл. Академика Курчатова, 1, Москва, 123182 Россия

²Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН
Ленинский проспект, 31, Москва, 119071 Россия

*e-mail: aa-kirsh@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.12.2018 г.

После доработки 28.01.2019 г.

Принята к публикации 30.01.2019 г.

Рассмотрена фильтрация высокодисперсных аэрозолей модельными фильтрами, состоящими из композитных волокон, на поверхности которых имеются пористые проницаемые оболочки (слои) дискретной структуры, состоящие из более тонких параллельных волокон. Рассчитаны силы сопротивления и коэффициенты диффузионного захвата субмикронных частиц в зависимости от пористости фильтров, параметров оболочек и диффузионного числа Пекле, при которых существенно возрастает эффективность фильтров.

DOI: 10.1134/S0023291219040062

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема интенсификации процесса тонкой фильтрации воздуха с целью уменьшения сопротивления фильтров потоку без уменьшения эффективности улавливания частиц решается на протяжении целого столетия. Ее решение важно для экономии энергии при прокачке воздуха через фильтрующие системы. И особенно важно отметить, что совершенствование фильтрации всегда остается актуальным в связи с необходимостью уменьшить сопротивление дыханию в респираторах.

Одним из способов решения этой проблемы является зарядка волокон фильтра. Примером тому являются фильтры ФП [1, 2] и одноразовый респиратор “Лепесток” [3], который производился из фильтр-материала ФП (всего было выпущено 5 млрд респираторов). Фильтры ФП обладают большой начальной эффективностью, но при уменьшении зарядов на волокнах в результате различных воздействий в процессе эксплуатации их эффективность снижается.

Другим интересным способом повысить эффективность улавливания частиц без заметного увеличения сопротивления потоку является создание на волокнах фильтра пористого проницаемого слоя [4–7]. Из практики хорошо известно, что при образовании осадка на волокнах фильтра

эффективность улавливания частиц начинает быстро расти, при этом перепад давления довольно долго не изменяется. Этот способ интенсификации тонкого пылеулавливания пытались осуществить путем создания на волокнах пористого слоя в виде иголок [4, 5] или из слоя более тонких волокон [6, 7]. Фильтры из волокон с оболочками особенно полезны для анализа содержания частиц в воздухе, поскольку пробы воздуха обычно отбирают при высокой скорости его прокачки, и в этом случае возможен отскок частиц от гладких волокон. (Теоретически условия отскока субмикронных частиц от волокон были изучены в [8].) Кроме того, пористая оболочка на волокнах надежно улавливает и более крупные частицы благодаря ситовому эффекту осаждения. Следовательно, фильтрующие материалы из композитных волокон должны обладать и более высоким критерием качества γ , чем исходные фильтры из гладких волокон без оболочек. Критерий качества характеризуется отношением [4]

$$\gamma = -\ln(n/n_0)/(\Delta p/U\mu), \quad (1)$$

где n_0 и n – концентрация частиц до фильтра и за ним, Δp – перепад давления, μ и U – вязкость и скорость воздуха. Логарифм коэффициента проскока частиц через фильтр $\ln(n/n_0) = 2a_0L\eta$ и перепад давления $\Delta p/\mu U = FL$ определяются длиной

волокон, приходящихся на единицу площади фильтра $L = \alpha H / \pi a_0^2$, где a_0 – радиус волокон, α – плотность упаковки фильтра, H – толщина фильтра, η – безразмерный коэффициент захвата частиц волокнами – доля потока воздуха, набегающего на волокно, из которого осаждаются все частицы, F – безразмерная сила сопротивления, действующая на единицу длины волокна. С учетом этих соотношений критерий качества равен размерной величине:

$$\gamma = 2a_0\eta/F. \quad (2)$$

Пористый проницаемый слой в настоящее время может быть создан из очень тонких волокон нанометрового диаметра из разных материалов. Здесь следует подчеркнуть, что просто введение нановолокон в структуру фильтра не столь эффективно, как изготовление из них пористых оболочек на толстых волокнах. Дело в том, что значения силы сопротивления и критерия качества для фильтров, состоящих из монодисперсных волокон, и фильтров из двух сортов волокон с сильно различающимися диаметрами мало различаются [4]. Это объясняется тем, что при числе Рейнольдса $Re < 1$ очень сильно проявляется взаимное влияние волокон. Тонкое волокно, помещенное в пространство между толстыми волокнами, испытывает небольшое сопротивление потоку, но так как скорость на его поверхности равна нулю, то резко меняется профиль течения около толстого волокна, возрастает градиент скорости и растет сила сопротивления толстого волокна. Это же справедливо и для коэффициента диффузионного захвата. Поэтому критерий качества для фильтров из полидисперсных волокон рассчитывают по среднему диаметру волокон [4]. Однако в случае, если из тонких волокон создают оболочку на более толстом волокне, величина η композитного волокна заметно возрастает. Особенно наглядно это должно проявляться для высокопористых фильтров. Дело в том, что в диапазоне значений $\alpha = 0.02-0.1$ сила F слабо зависит от пористости [4], и увеличение толщины волокон за счет оболочки приводит к небольшому росту F , в то время как η может существенно возрасти, особенно, при улавливании медленно диффундирующих более крупных частиц, например, в области максимума проскока [4] или наночастиц при большой скорости.

Поскольку было очевидно, что повышение эффективности возможно за счет увеличения проницаемости оболочки, то ее пытались сделать из как можно более тонких волокон, чтобы использовать эффект скольжения газа, уменьшающий сопротивление тонких волокон в оболочке и, следовательно, сопротивление композитного волокна с оболочкой. Предполагалось, что идеальными тонкими волокнами для создания обо-

лочка являются нанотрубки. Парк и Ли подробно исследовали эффективность таких фильтров [6], но эффект, особенно для наночастиц, был мал. Во-первых, выращенный слой нанотрубок был тонок, а плотность упаковки слоя нанотрубок была слишком велика, и, во-вторых, судя по приведенным фотографиям, в большинстве опытов отдельные нановолокна перекрывали пространство между соседними волокнами с оболочкой, что дискредитировало идею композитных волокон. Учитывая это, недавно авторы работы [7] исключили перекрытие длинных нанотрубок между композитными волокнами. Они привели результаты измерения перепада давления и эффективности осаждения частиц для фильтров с волокнами трех разных диаметров, покрытых слоями нанотрубок, и показали увеличение критерия качества. Максимальное увеличение критерия качества (в полтора раза) было получено при улавливании частиц диаметром $2r_p = 0.1-0.3$ мкм (соответствующих области максимума проскока) в основном благодаря осаждению за счет эффекта зацепления в шероховатом поверхностном слое оболочки. В то же время для очень мелких частиц, когда основным механизмом осаждения является диффузия, критерий качества почти не изменился, что свидетельствует о малой проницаемости оболочки. Более того, фильтры, на волокнах которых выращивали оболочку, имели начальную высокую плотность упаковки $\alpha > 0.2$, при которой сила сопротивления волокна F очень резко зависит от α , и в этом случае с ростом толщины оболочки сопротивление композитного волокна в фильтре возрастает примерно так же, как и коэффициент захвата.

Стремление увеличить расход газа через оболочку за счет уменьшения толщины волокон в оболочке и, следовательно, за счет использования эффекта скольжения газа вполне обосновано. Кроме того, благодаря эффекту скольжения газа возрастает осаждение частиц на эти волокна в оболочке из-за влияния собственного размера частиц. И создание оболочек из нанотрубок в этом случае представляется удачным решением, особенно для аналитической фильтрации субмикронных аэрозолей при большой скорости. Отскока частиц от нанотрубок при этом не должно быть, поскольку в оболочке скорость течения существенно меньше скорости невозмущенного течения U перед фильтром, и число Стокса не превышает критического значения [8]. Отметим также, что не должно быть и гипотетического “теплового отскока” от твердых нанотрубок наночастиц, имеющих большую скорость броуновского движения. (Отскок наночастиц хлорида натрия от нанотрубок не был обнаружен в специальных исследованиях [9].) Поэтому использование нанотрубок и других нановолокон может быть перспективным, но для достижения макси-

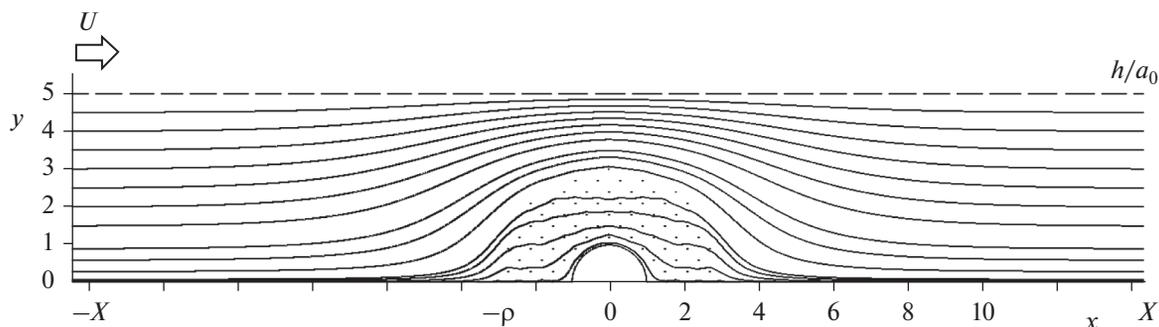


Рис. 1. Линии тока (входные ординаты 0.001, 0.01, 0.03, 0.06, 0.09, 0.3, 0.6, 0.9, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5) при обтекании стоксовым потоком ряда параллельных волокон с пористыми проницаемыми оболочками, состоящими из параллельных тонких волокон с гексагональной упаковкой. Схема расчетной ячейки: $a_0/h = 0.2$, $a_f = 0.01a_0$.

мального увеличения критерия качества фильтра следует подобрать оптимальную толщину и плотность упаковки оболочек в зависимости от диаметра волокон и пористости выбранного фильтра.

В данном сообщении будут исследованы поле течения и диффузионное осаждение частиц в фильтрах из волокон, покрытых оболочками, в зависимости от параметров оболочки и диффузионного числа Pe , учитывающего размер наночастиц, диаметр волокон и скорость потока перед фильтром.

2. СТОКСОВО ПОЛЕ ТЕЧЕНИЯ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОГЛОЩЕНИЯ ЧАСТИЦ В РЯДУ КОМПОЗИТНЫХ ВОЛОКОН

Задача об определении оптимальной структуры фильтра из композитных волокон, соответствующей заданным условиям фильтрации, является многопараметрической. И первым условием при выборе фильтра для модификации волокон является его высокая начальная пористость. С ростом толщины оболочки эффективность улавливания увеличивается, но при этом растет и сопротивление. Пока плотность упаковки не превышает $\alpha = 0.25-0.3$, сопротивление растет медленно, а далее выбор толщины оболочки и ее проницаемости определяются заданными размером частиц и скоростью потока перед фильтром, которые определяют расход воздуха через оболочку и эффективность его очистки в ней. Чтобы проследить тенденцию роста критерия качества фильтра γ в зависимости от структуры оболочки, следует исключить неопределенность структуры реальных фильтров и оболочек. Расположение волокон в фильтре и структура оболочек на волокнах должны быть заданы. Поле течения и осаждение частиц будем рассчитывать в модельном фильтре с упорядоченными параллельными волокнами, покрытыми оболочками, также состоя-

щими из упорядоченных параллельных волокон, но существенно меньшего радиуса (рис. 1).

Фильтрующие свойства волокон с пористыми оболочками исследовались ранее на основе модельного поля течения Стокса–Бринкмана в связи с проблемой образования осадка частиц на фильтре [10–13]. В этих работах была найдена связь коэффициента захвата композитного волокна с толщиной и проницаемостью оболочек, расстоянием до соседних волокон, размером частиц и скоростью течения для разных механизмов осаждения. Также было показано, что асимметрия цилиндрической оболочки вдоль потока практически не влияет на силу сопротивления и коэффициент захвата. Основным результатом этих работ явилось то, что было показано существование явно выраженного максимума в зависимости γ от радиуса оболочки, который для заданных условий фильтрации определялся параметрами фильтра и проницаемостью оболочки. Эти результаты были получены при условии, что внутри оболочки входящий поток очищается полностью. В этом предположении при решении уравнения конвективной диффузии в качестве граничного условия на поверхности оболочки концентрация частиц полагалась равной нулю. Коэффициент захвата рассчитывался как сумма потока частиц, входящих в оболочку, и потока частиц, осаждающихся из потока на внешней поверхности пористой оболочки. И поскольку осаждение в оболочке принималось полным, то при больших значениях Pe коэффициент захвата внутри оболочки был равен расходу воздуха через оболочку.

Однако для оболочки, представляющей собой дискретную пористую структуру, эффективность улавливания частиц может быть меньшей 100%. В этом случае часть частиц проходит через оболочку, не задерживаясь, и задача расчета усложняется, поскольку приходится оценивать осаждение на каждом нановолокне с учетом изменяю-

шейся скорости внутри оболочки, хотя основные закономерности диффузионного осаждения наночастиц на нановолокнах, полученные при стоковом режиме течения при $Re < 1$, должны выполняться. Прежде всего, требуется выполнение стокова режима течения, при котором $2aU < \nu$, где ν – кинематическая вязкость воздуха, равная при нормальных условиях $0.15 \text{ см}^2/\text{с}$, откуда следует, что максимальная скорость через фильтр с волокнами диаметром до $2a = 20 \text{ мкм}$ не должна превышать 70 см/с . Это – большая скорость фильтрации даже при заборе проб, и в отсутствие ситового эффекта улавливания частиц в оболочке часть частиц может проскакивать через оболочку, хотя внутри оболочки скорость существенно ниже.

Использование фильтров из волокон с оболочками перспективно для целей тонкой фильтрации, в том числе для респираторов и для высокоскоростной аналитической фильтрации. Поэтому, а также в связи с возросшими возможностями создания оболочек с регулируемой толщиной и проницаемостью необходимо выяснить, как зависит коэффициент захвата композитного волокна от параметров фильтра, размера частиц и условий фильтрации с учетом эффективности улавливания частиц из потока, проходящего через оболочку, которая, в свою очередь, также зависит от многих переменных, таких как толщина и пористость оболочки, расход воздуха, радиус частиц и волокон и т.д. Следует подчеркнуть, что тонкие волокна в оболочке обтекаются с разной скоростью.

В расчетах в качестве модельного фильтра будет использован перпендикулярный потоку ряд параллельных волокон с высокопористой коаксиальной проницаемой оболочкой, состоящей из тонких волокон. Отдельный ряд параллельных волокон полностью отражает специфику стокова стесненного течения в реальных фильтрах, и более полувека задачи теории фильтрации рассматриваются на основе поля течения в ряду волокон, аналитически полученного Мияги [14]. Результаты численных расчетов силы сопротивления и коэффициента захвата для волокон с оболочками будут сравниваться с аналитическими данными для сплошных волокон.

Определяющие уравнения

Поля скоростей и концентрации в задаче обтекания ряда композитных волокон находились совместным численным решением стационарных уравнений Стокса и конвективной диффузии:

$$\nabla p = \Delta \mathbf{u}, \quad \text{div} \mathbf{u} = 0, \quad (3)$$

$$2Pe^{-1} \Delta n - \mathbf{u} \cdot \nabla n = 0, \quad (4)$$

где $p = \tilde{p}a_0/U\mu$ и $u = \tilde{u}/U$ – безразмерные давление и скорость потока, $n = \tilde{n}/n_0$ – безразмерная концентрация. Здесь Δ – оператор Лапласа, ∇ – оператор Набла, $\mathbf{u} = \{u, v\}$ – вектор скорости потока, $\mathbf{u} \cdot \nabla n \equiv u \partial n / \partial x + v \partial n / \partial y$, $Pe = 2a_0U/D$ – диффузионное число Пекле, определенное для диаметра волокна-стержня, окруженного пористой оболочкой, D – коэффициент диффузии частиц; знаком “тильда” отмечены размерные величины. За характерные масштабы выбраны радиус волокна-стержня a_0 , скорость набегающего потока U , входная концентрация n_0 . Расчетная ячейка, учитывающая симметрию задачи, показана на рис. 1. В качестве граничных условий на поверхности волокон ставились условия прилипания $\mathbf{u} = 0$ и полного поглощения $n = 0$. На входной границе ячейки при $x = -X$ ставились условия невозмущенного потока $\mathbf{u} = \{1, 0\}$ и однородной концентрации $n = 1$, на выходе при $x = X$ – условия отсутствия вязких напряжений и выравнивания концентрации $\partial n / \partial x = 0$. На боковых гранях ячейки ставились условия симметрии для концентрации и компонент скорости. Метод расчета изложен в [15].

Сила сопротивления и коэффициент захвата для композитного волокна с оболочкой находились как сумма соответствующих величин, рассчитываемых для волокна-стержня и всех тонких волокон оболочки. Безразмерная сила сопротивления единицы длины волокна-стержня и волокна в оболочке находилась как

$$F = \int_S T_x d\Sigma, \quad (5)$$

где $\mathbf{T} = (-p\mathbf{I} + \boldsymbol{\sigma}')\mathbf{n}$ – поток импульса, $\boldsymbol{\sigma}'$ – тензор вязких напряжений, \mathbf{I} – единичный тензор, \mathbf{n} – вектор внешней нормали к поверхности, $d\Sigma$ – элемент поверхности, S – площадь поверхности волокна. Коэффициент захвата частиц волокном – безразмерный интегральный поток точечных частиц на единицу длины волокна – рассчитывался как

$$\eta = 2Pe^{-1} \int_0^\pi \frac{\partial n}{\partial r} d\theta, \quad (6)$$

где r, θ – безразмерные полярные координаты. Отметим, что сила сопротивления композитного волокна в ряду связана с безразмерным перепадом давления на ряду волокон соотношением $\Delta p = Fa_0/2h$, а коэффициент проскока частиц выражается через коэффициент захвата композитного волокна как $n/n_0 = 1 - \eta a_0/h$. Далее мы сравним силы сопротивления и коэффициенты захвата композитного волокна с оболочкой, рассчитанные для модели оболочки с дискретной структурой.

рой и для модельного поля течения Стокса–Бринкмана [10].

Поле течения Стокса–Бринкмана

Модель Стокса–Бринкмана не рассматривает обтекание каждого дискретного элемента пористой среды. Пористое тело аппроксимируется континуальным слоем с однородной осредненной проницаемостью, где проницаемость может быть выражена через плотность упаковки волокон β . При $Re \ll 1$ стационарное течение вязкой несжимаемой жидкости вне и внутри пористой области описывается соответственно уравнениями Стокса (3) и уравнениями Бринкмана [16]

$$\nabla p^i = \Delta \mathbf{u}^i - S^2 \mathbf{u}^i, \quad \nabla \cdot \mathbf{u}^i = 0, \quad (7)$$

где индексы i и e обозначают соответственно области внутри и вне пористой оболочки, $S = a_0/\sqrt{k}$ – безразмерный параметр, связанный с проницаемостью пористой среды k . Для нахождения поля течения внутри и вне оболочки решения уравнений (4) и (7) сшиваются на внешней пористой границе с помощью условий непрерывности компонент скоростей и напряжений

$$u_r^i = u_r^e, \quad u_\theta^i = u_\theta^e, \quad p^i = p^e, \quad \tau_{r\theta}^i = \tau_{r\theta}^e \quad (8)$$

при $r = \rho$,

где $\tau_{r\theta}$ – тангенциальное напряжение, $\rho = \tilde{a}a_0^{-1}$ – безразмерный внешний радиус пористой оболочки. На внутренней границе оболочка/непроницаемое волокно ставятся условия прилипания. Отметим, что, в отличие от уравнения Дарси $\nabla p^i = -S^2 \mathbf{u}^i$, уравнение Бринкмана позволяет полностью удовлетворить всем условиям сшивки (8) и описать плавное изменение профиля скорости вблизи пористой границы. В работе [12] методом граничной коллокации было получено поле течения в ряду волокон с оболочками и было показано, что численное решение уравнений Стокса–Бринкмана для ряда совпадает с решениями для гексагональной упаковки композитных волокон и для композитного волокна в ячеечной модели Кувабары. Отметим, что использование ячеечной модели позволило впервые вывести аналитические решения для функций тока, полей скорости и силы сопротивления пористого и композитного цилиндров [17, 10] (см. Приложение). Для расчета осаждения частиц на волокно с пористой оболочкой при решении уравнения конвективной диффузии (4) на внешней границе оболочки используем приближенное условие полного поглощения $n = 0$, в результате чего априори получаем предельно возможные значения коэффициентов захвата, которые связаны с параметром проницаемости (параметром Бринкмана). Сила сопротивления и коэффициент за-

хвата в данной модели являются функциями параметра S , который, в свою очередь, является функцией плотности упаковки включений пористой среды β : $S = (2a_0/a_f)[\beta/k(\beta)]^{1/2}$, где a_f – радиус тонкого волокна в оболочке, $k(\beta) = 4\pi/F(\beta)$, $F(\beta)$ – сила сопротивления тонкого волокна. Для гексагональной упаковки параллельных тонких волокон в оболочке $k(\beta) = -0.5 \ln \beta + \beta - 0.75 - 0.25\beta^2$ и $\beta = (2\pi/\sqrt{3})(a_f/2h_f)^2$, где $2h_f$ – расстояние между осями соседних тонких волокон.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Поле течения и поглощение наночастиц в оболочке

На рис. 2 приводится пример распределения концентрации наночастиц в потоке в оболочке на волокне в ряду с $a_0/h = 0.2$, где точечные незаряженные частицы осаждаются за счет единственного механизма – конвективной диффузии. В этом примере расчеты выполнены при трех значениях Re ($\beta = 0.016$, $F = 71.95$). Видно, что с уменьшением диффузионной подвижности частиц, т.е. с ростом Re , диффузионные следы за тонкими волокнами в оболочке увеличиваются, и коэффициент захвата композитного волокна уменьшается.

На рис. 3 показаны профили скорости и концентрации частиц в оболочке на вертикальном отрезке при $\theta = \pi/2$. Видно, что даже для высокопористой оболочки скорость течения и расход в ней малы (рис. 3а), и только вблизи центрального волокна-стержня при малых Re происходит осаждение частиц (рис. 3б, кривая 1, левая часть). Задача поиска оптимальной структуры оболочек – многопараметрическая, и для каждого заданных условий фильтрации требуется отдельный расчет. Заранее можно только сказать, что при создании оболочек на волокнах фильтров с целью увеличения их критерия качества исходные фильтры должны быть высокопористыми.

Диффузионное осаждение точечных частиц в оболочке с постоянной толщиной и разной пористостью

Рассчитанные значения коэффициента захвата наночастиц в ряду композитных волокон в зависимости от Re показаны на рис. 4. Параметры пористости оболочек и значения безразмерных сил сопротивления композитных волокон с оболочками приведены в табл. 1. На рис. 4 для сравнения по формуле Натансона $\eta_0 = 2.9(F_0/4\pi)^{1/3} Re^{-2/3}$ построены кривые для волокна-стержня без оболочки (кривая б; $a_0/h = 0.1$, $F_0 = 7.54$).

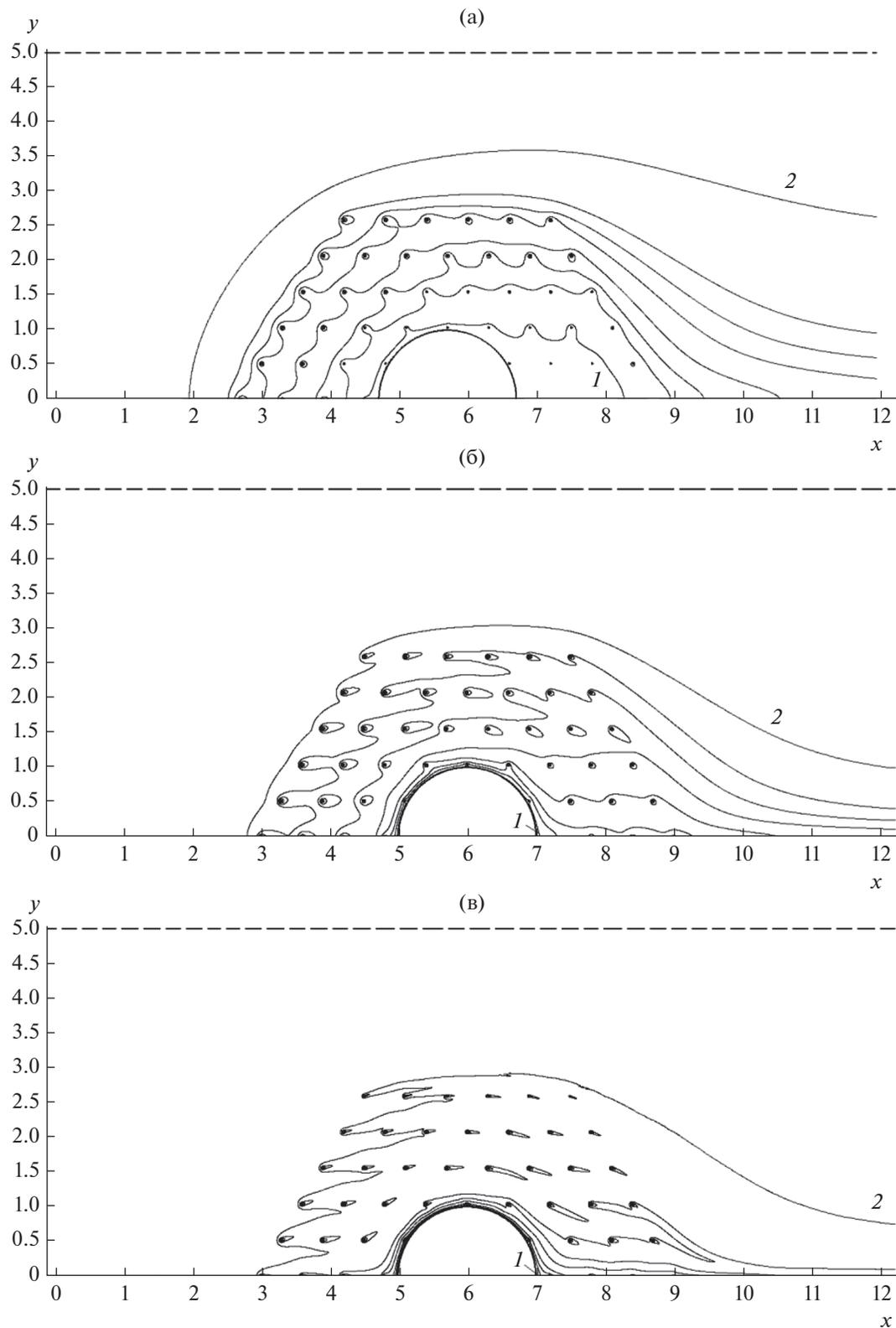


Рис. 2. Профили концентрации точечных наночастиц в оболочке с $\rho = 3$ при $Re = 10^2$ и $Re_f = 1$ (а), $Re = 10^3$ и $Re_f = 10$ (б), $Re = 10^4$ и $Re_f = 100$ (в); Re определено для волокна-стержня диаметром $2a_0$, Re_f – для тонкого волокна в оболочке диаметром $2a_f$. Волокна расположены в ряду с $a_0/h = 0.2$, $a_f = 0.01a_0$. Изолинии концентрации частиц рассчитаны для значений $n = 0.01$ (1), 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.999 (2).

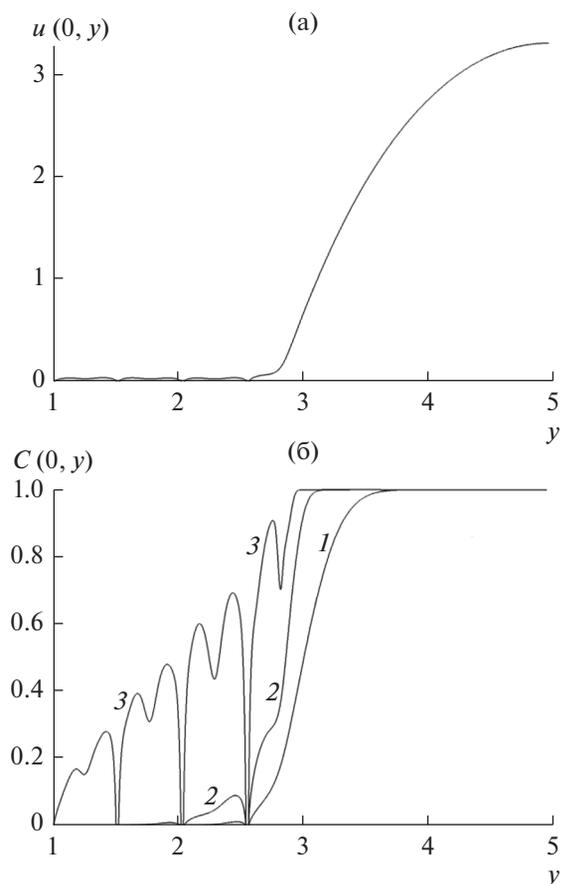


Рис. 3. Профиль скорости потока (а) и профили концентрации при $Re = 100$ (1), 1000 (2), 10000 (3) (б) на вертикальном отрезке при $\theta = \pi/2$ в пористой дискретной оболочке. Данные те же, что на рис. 2.

Из рис. 4 следует, что при $Re < 100$ зависимости коэффициента захвата композитным волокном от числа Пекле в логарифмических координатах имеют вид прямых, параллельных аналогичным прямым для сплошных волокон, поскольку в этой области Re осаждение наночастиц происходит в основном на внешней оболочке и вклад в величину коэффициента захвата от отфильтрованного потока, проходящего через оболочку, мал. Для тонких волокон в оболочке коэффициент захвата соответствует в сто раз меньшим числам Пекле, определенным по радиусу тонкого волокна, $Re_f = Re a_f/a_0$ и, следовательно, большим коэффициентам захвата нановолокон (порядка единицы). В этих условиях все вошедшие частицы полностью осаждаются в оболочке. С ростом числа Пекле (при $Re > 100$) коэффициент захвата уменьшается, причем при фиксированном Re максимальное значение η соответствует волокнам с более пористыми оболочками, через которые расход больше. Так происходит при $Re = 10^3 - 10^5$, пока в оболочке эффективность оса-

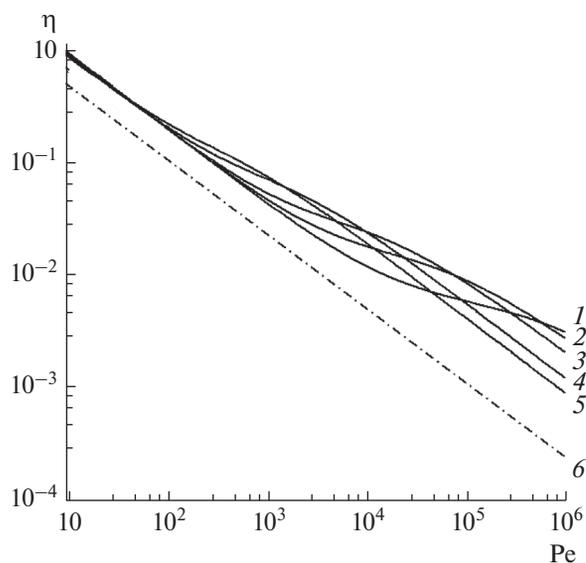


Рис. 4. Зависимости коэффициента захвата точечных частиц композитным волокном с пористой проникающей дискретной оболочкой (1–5) в ряду волокон от числа Пекле; параметр ряда $a_0/h = 0.1$, безразмерный внешний радиус оболочки $\rho = 3$. Кривые 1–5 соответствуют разным значениям плотности упаковки тонких волокон с $a_f = 0.01a_0$ в оболочке с $\beta = 0.0091$ (1), 0.0040 (2), 0.00227 (3), 0.0010 (4) и 5.66×10^{-4} (5); 6 – волокно без оболочки единичного радиуса.

ждения высока (малы числа Пекле Re_f). При $Re \sim 10^6$ максимальное значение η соответствует оболочке с наибольшей плотностью упаковки (кривая 1), в которой достигается наибольшая степень очистки, но с минимальным, по сравнению с другими оболочками, расходом.

Доля частиц, осевших на внутреннее волокно-стержень, окруженное оболочкой, даже очень высокопористой, чрезвычайно мала (рис. 5, кривые 1–4) по сравнению с коэффициентом захвата частиц волокном без оболочки (5), так же как и мала его сила сопротивления потоку (рис. 6), что объясняется эффектом экранировки (гидродинамической тенью от тонких волокон в оболочке). На рис. 5 видно, что, чем более плотной является оболочка, тем меньшая доля частиц достигает внутреннего волокна-стержня и осаждаются на нем. И что особенно интересно – это рост осаждения на внутреннее волокно с ростом Re при $Re > 10^3$, когда уменьшается осаждение на тонкие волокна в оболочке.

Следует отметить что, несмотря на большую толщину и на высокую пористость самой плотной рассмотренной нами оболочки с пористостью $\varepsilon = 1 - \beta \sim 99\%$, значения силы сопротивления композитного и сплошного волокон различаются незначительно (рис. 6). В результате почти

Таблица 1. Параметры пористых проницаемых оболочек (плотность упаковки тонких волокон β в оболочке с гексагональной структурой и параметр Бринкмана S) и значения безразмерной силы сопротивления F волокон с оболочками радиусом $\rho = 3$, $a_0/h = 0.1$, $a_f = 0.01a_0$; F_K – сила сопротивления композитного волокна в ячейке Кувабары, расчет по формуле (П.3); $F_0 = 19.91$ – сила сопротивления непроницаемого волокна с $a_0/h = 0.3$

β	F	S	F_K
0.0091	19.166	15.008	18.907
0.0040	18.670	8.954	18.488
0.00230	18.214	6.284	18.034
0.0015	17.152	4.799	17.556
0.0010	16.895	3.863	17.062
0.00056	16.485	2.754	16.0485

до $Re \sim 10^3$ расход через оболочку не дает вклада в величину η и, следовательно, слабо влияет на значение критерия качества. Именно это и наблюдалось в экспериментах в цитируемых работах [5, 6], где пористость оболочек была еще меньше.

Пример расчета $\eta(\beta)$ и роста отношения критериев качества фильтров из волокон с оболочками и без, $\gamma/\gamma_0 = \ln(P)F_0/\ln(P_0)F$, где P – проскок, в зависимости от β приведены для разных значений Re на рис. 7 и 8 соответственно. Видно, что для одного и того же фильтра при разных услови-

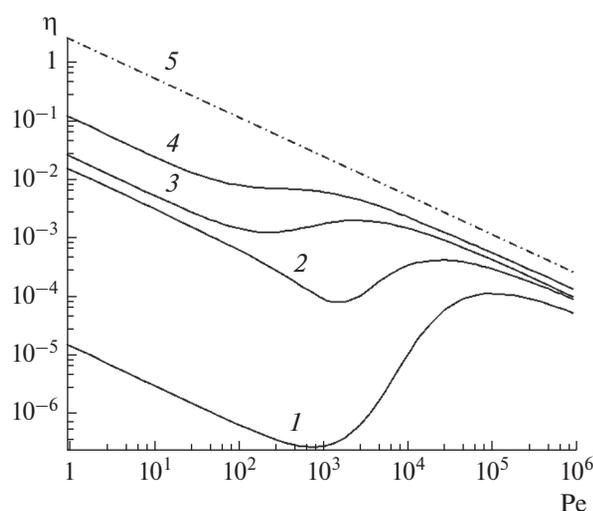


Рис. 5. Зависимости от числа Пекле коэффициента захвата внутренним волокном-стержнем в ряду с $a_0/h = 0.1$, окруженным пористой оболочкой из тонких волокон с $\rho = 3$ и $a_f = 0.01a_0$; плотность упаковки оболочки $\beta = 0.0010$ (1), 0.00227 (2), 0.0040 (3), 0.0091 (4); 5 – волокно без оболочки.

ях фильтрации (разных Re) максимальные значения коэффициента захвата композитного волокна соответствуют разным значениям β и что критерий качества высокопористых фильтров может возрастать в несколько раз. Осаждение наночастиц в оболочках разной толщины будет рассмотрено ниже.

Сравнение с моделью Стокса–Бринкмана

Сравнение сил сопротивления композитных волокон, рассчитанных для оболочки дискретной структуры и для оболочки с осредненной проницаемостью (для поля течения Стокса–Бринкмана) дано в табл. 1; имеет место удовлетворительное согласие расчетов по двум моделям. Однако эффективность осаждения частиц, рассчитанная по этим моделям, начинает существенно различаться с ростом числа Пекле, что объясняется неполным поглощением частиц в дискретной оболочке (см. рис. 9). Видно, что кривая 2, рассчитанная с использованием модели Стокса–Бринкмана, при $Re > 10^5$ стремится к своему предельному значению, равному расходу газа через оболочку. Отсюда следует, что вклад от оболочки в общий коэффициент захвата частиц композитным волокном должен заметно проявляться в

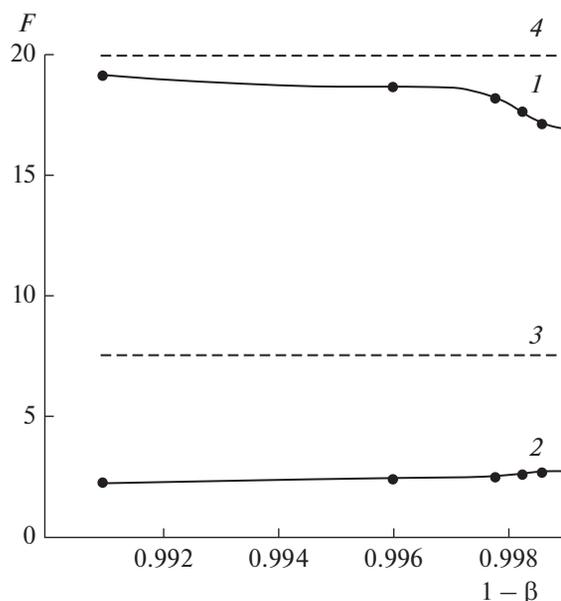


Рис. 6. Зависимости безразмерной силы сопротивления композитного волокна (1) с оболочкой гексагональной структуры с $\rho = 3$ в ряду с $a_0/h = 0.1$ и волокна-стержня внутри оболочки (2) от пористости оболочки; 3 – сила сопротивления волокна без оболочки, $F_0 = 7.54$, $a_0/h = 0.1$; 4 – сила сопротивления непроницаемого волокна с радиусом, равным радиусу оболочки, $F_0 = 19.91$, $a_0/h = 0.3$.

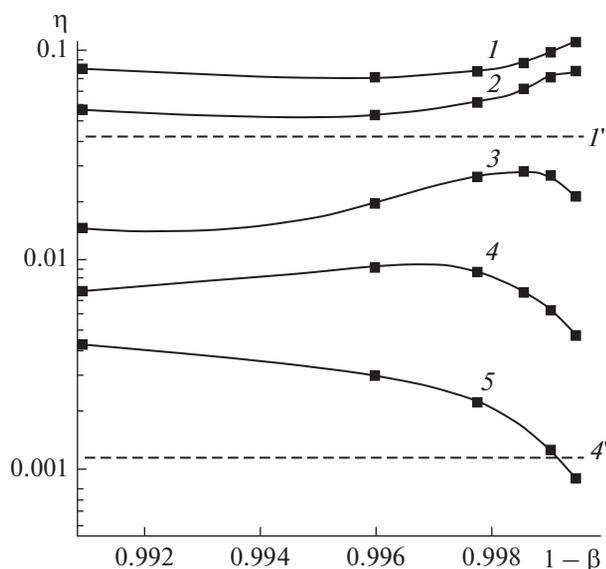


Рис. 7. Зависимости коэффициента захвата точечных частиц композитным волокном с оболочкой из тонких волокон с $a_f = 0.01a_0$ и гексагональной структурой с $\rho = 3$ в ряду с $a_0/h = 0.1$ от пористости оболочки при $Pe = 500$ (1), 10^3 (2), 10^4 (3), 10^5 (4), 10^6 (5); I' , $4'$ – непроницаемое волокно без оболочки с радиусом a_0 , $a_0/h = 0.3$, $I' - Pe = 500$, $4' - Pe = 10^5$.

области максимума проскока через фильтр субмикронных частиц с малым коэффициентом диффузии, на осаждение которых влияет их собственный размер.

Оболочки разной толщины с одинаковой пористостью

Аналогичный предыдущему вывод о решающей роли потока аэрозоля через оболочку следует и при анализе зависимости коэффициента захвата частиц композитным волокном от толщины оболочки. В качестве примера был рассмотрен модельный ряд параллельных волокон с $a_0/h = 0.1$ с оболочками, состоящими из гексагонально упакованных тонких волокон с низкой плотностью упаковки ($\beta = 3.6 \times 10^{-4}$, $a_f = 0.1a_0$, $S = 2.126$).

На рис. 10 показана зависимость силы сопротивления волокна от толщины оболочки. И снова мы видим, что, несмотря на высокую пористость оболочки ($\epsilon = 0.99964$), из-за специфики стокового стесненного течения [4] сила сопротивления композитного волокна отличается незначительно от F сплошного волокна того же радиуса. Поэтому зависимости диффузионного осаждения точечных частиц от Pe , представленные на рис. 11 (пунктирные кривые $2'-4'$), имеют такой же вид, как и на рис. 4, за исключением того, что по причине высокой пористости оболочки ее влияние

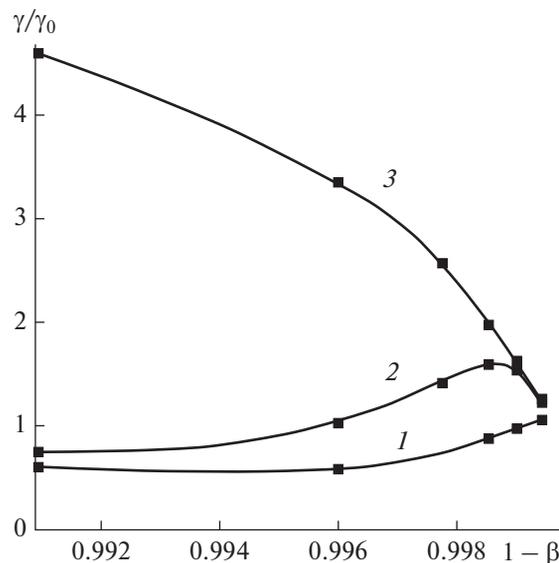


Рис. 8. Зависимости отношения критериев качества фильтров из волокон с оболочками γ и без оболочек γ_0 от пористости оболочек при числах Пекле: $Pe = 10^3$ (1); 10^4 (2); 10^6 (3); $a_0/h = 0.1$, $\rho = 3$, $a_f = 0.01a_0$.

на величину η начинает проявляться при меньших значениях Pe . Рисунок 11 показывает, что чем толще оболочка, тем больше η , поскольку возрастает доля отфильтрованного оболочкой набегающего потока. Однако при этом возрастает и сила сопротивления. И поскольку сила сопротивления F слабо зависит от пористости оболочки при малых β , то рост критерия качества определяется коэффициентом захвата.

На рис. 12 показано отношение критериев качества фильтров из волокон с оболочками и без них при осаждении точечных частиц при разных числах Pe в зависимости от ρ . Из приведенных данных следует, что влияние оболочек на осаждение частиц резко возрастает с ростом Pe , когда фильтрация идет не в поверхностном слое, а внутри оболочки. Видно также, что при меньших значениях Pe , когда осаждение точечных частиц в основном происходит из внешнего потока и роль оболочки мала, критерий качества фильтра с увеличением толщины оболочки падает и может быть даже меньше, чем для фильтра из волокон без оболочек (при $\rho > 2$, кривые 1 и 2). Однако гораздо больший эффект от наличия оболочек может быть получен при фильтрации субмикронных частиц, для которых следует учитывать влияние собственного размера и механизм зацепления при осаждении на волокна в оболочке.

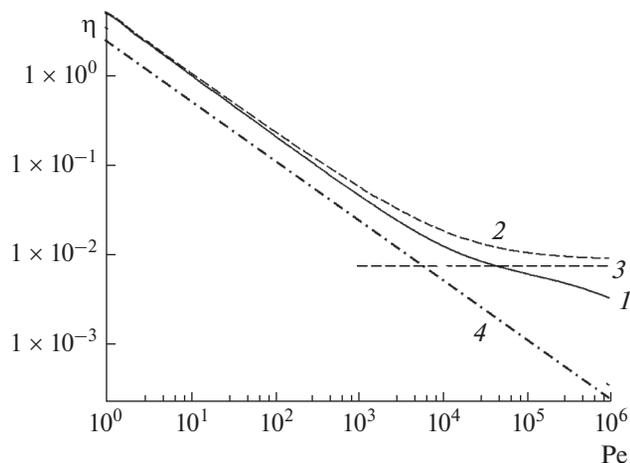


Рис. 9. Зависимости коэффициента захвата точечных частиц волокном с пористой оболочкой в ряду от числа Пекле: $a_0/h = 0.1$, $\rho = 3$. Кривая 1 – оболочка с плотностью упаковки $\beta = 0.0091$, 2 – модель Стокса–Бринкмана, 3 – расход через оболочку в модели Стокса–Бринкмана, 4 – непроницаемое волоконно-стержень без оболочки радиусом a_0 .

Диффузионное осаждение частиц конечного размера

На рис. 11 представлены зависимости коэффициента захвата композитным волокном от Re (кривые 2–4) для случая диффузионного осаждения частиц с размером, соизмеримым с диаметром волокон в оболочке. В этом случае учитывалось влияние собственного размера частиц при осаждении их на волокнах, что увеличило степень очистки потока воздуха, проходящего через оболочку. (Теория осаждения частиц с учетом их конечного размера дана в [4].) Как видно на рис. 11, коэффициент захвата при фиксированном Re увеличивается в несколько раз, причем тем заметнее, чем больше толщина оболочки. Рассчитанные значения γ/γ_0 даны на рис. 13. Небольшой рост качества фильтров при меньших числах Re объясняется тем, что осаждение частиц происходит в основном из внешнего потока, а вклад очищаемого оболочкой потока мал.

В заключение рассмотрим влияние зацепления частиц конечного размера с разными значениями параметра зацепления на волокнах в оболочке на примере того же ряда композитных волокон с $a_0/h = 0.1$. Оболочки с радиусом $\rho = 3$ и гексагональной структурой состоят из тонких волокон с $a_1 = 0.1a_0$ (рис. 14а) и $a_2 = 0.01a_0$ (рис. 14б) с постоянным расстоянием между волокнами (с постоянной длиной волокон в оболочке) и с плотностью упаковки $\beta_1 = 0.0362$ и $\beta_2 = 0.000363$ соответственно. Мы выбрали большие и одинаковые значения параметра зацепления, при кото-

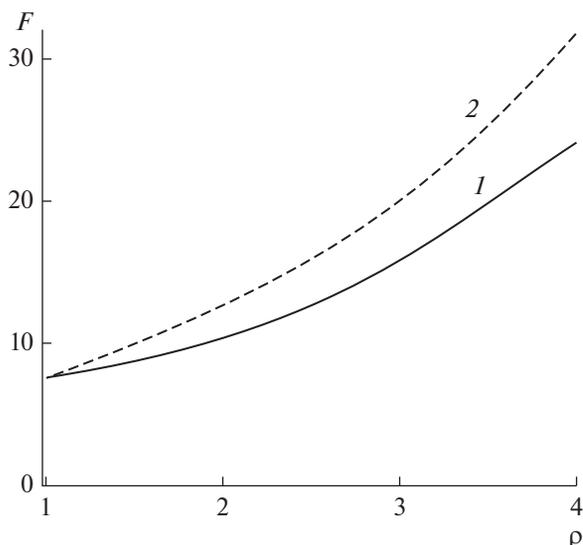


Рис. 10. 1 – Зависимость силы сопротивления композитного волокна в ряду с $a_0/h = 0.1$ от радиуса оболочки ρ . Оболочка с гексагональной структурой с плотностью упаковки $\beta = 3.6 \times 10^{-4}$ состоит из тонких волокон с $a_f = 0.01a_0$. Параметр Бринкмана $S = 2.126$; 2 – сила сопротивления непроницаемого волокна с теми же значениями радиуса.

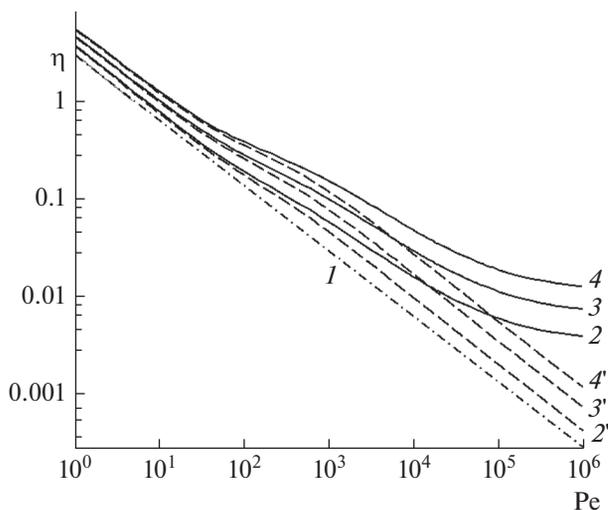


Рис. 11. Зависимости коэффициента захвата волокном с оболочкой с плотностью упаковки $\beta = 3.6 \times 10^{-4}$, состоящей из тонких волокон ($a_f = 0.01a_0$), от числа Пекле для точечных частиц при $R_f = 0$, $R = 0$ (1, 2'–4') и частиц конечного размера при $R_f = 0.5$, $R = 0.005$ (2–4) от радиуса оболочки: $\rho = 1$ (1), 2 (2, 2'), 3 (3, 3'), 4 (4, 4'); $a_0/h = 0.1$.

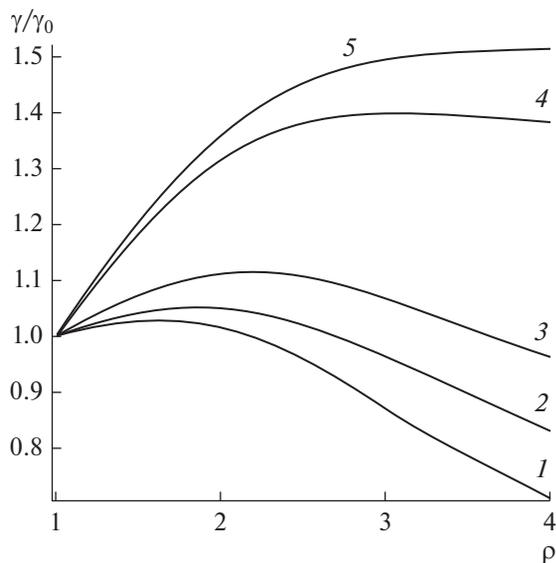


Рис. 12. Отношение критериев качества фильтров из волокон с оболочками и без оболочек от радиуса оболочки ρ при $Pe = 10$ (1), 50 (2), 100 (3), 500 (4), 1000 (5), частицы точечные, $R = 0$. Параметры те же, что и на рис. 11.

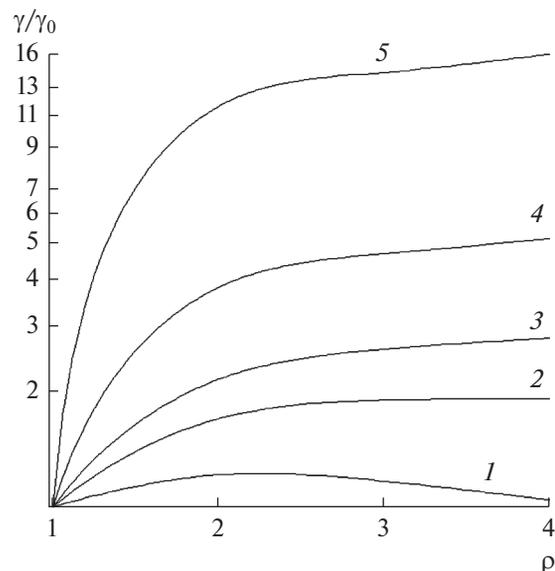


Рис. 13. Отношение критериев качества фильтров из волокон с оболочкой и без нее в функции радиуса оболочки ρ при $Pe = 10^2$ (1), 10^3 (2), 10^4 (3), 10^5 (4), 10^6 (5) с учетом зацепления: $R_f = 0.5$, $R = 0.005$. Параметры те же, что и на рис. 11.

рых на осаждение частиц на тонкие волокна в оболочке зацепление оказывает даже большее влияние, чем диффузия. Видно, что кривые 1 и 2 на обоих рисунках проходят значительно выше, чем кривые, рассчитанные для точечных частиц. Видно также, что кривые 1 на обоих рисунках, рассчитанные для $R_1 = r_p/a_1 = r_p/a_2 = 1$, лежат заметно выше кривых 2, рассчитанных для меньшего параметра зацепления $R_2 = r_p/a_1 = r_p/a_2 = 0.5$. Этот результат очевиден. Но значения η , рассчитанные при одинаковых Pe для композитных волокон с R_1 и R_2 с более плотной оболочкой (рис. 14а), оказались больше значений η для волокон с рыхлой оболочкой (рис. 14б). Это указывает на то, что для данных условий фильтрации меньший расход газа через более плотную оболочку и большая степень его очистки оказались предпочтительней. В данном примере коэффициенты захвата η неточечных частиц композитными волокнами рассчитаны численно для двух неаддитивных механизмов осаждения — за счет диффузии и зацепления, но без учета скольжения газа, которое должно заметно увеличивать осаждение частиц на тонких волокнах в оболочке. То есть обе пары кривых 1 и 2 на рис. 14а и 14б с учетом скольжения должны проходить несколько выше.

Таким образом, в работе показано, что при модификации поверхности волокон в рыхлых фильтрах и при росте сопротивления немногим более чем в два раза эффективность фильтрации может увеличиться на несколько порядков. В заключе-

ние стоит обратить внимание на то, что высокая степень очистки, которая может быть достигнута фильтрами из композитных волокон при весьма незначительном перепаде давления, соответствует степени очистки воздуха при использовании обычных фильтров НЕРА из субмикронных волокон при таком же перепаде давления. Однако фильтры с модифицированными грубыми волокнами диаметром порядка $2a_0 = 10$ мкм даже при высокой расчетной эффективности нецелесообразно использовать для суперочистки, так как небольшая случайная неоднородность структуры, понижающая эффективность тонковолокнистых фильтров в несколько раз, в случае фильтров из композитных волокон изменит эффективность на несколько порядков. Эти фильтры полезны там, где при заданной эффективности необходимо иметь минимальное сопротивление потоку, причем в течение продолжительного времени. Для суперочистки воздуха от субмикронных частиц необходимо использовать фильтры из субмикронных волокон. О получении фильтров из алюминиевых тонких волокон диаметром 0.1 мкм с оболочкой из наноиголок сообщается в [18].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано осаждение субмикронных частиц в волокнистых фильтрах, на поверхности волокон которых имеются пористые проникаемые оболочки. На примере модельного фильтра, со-

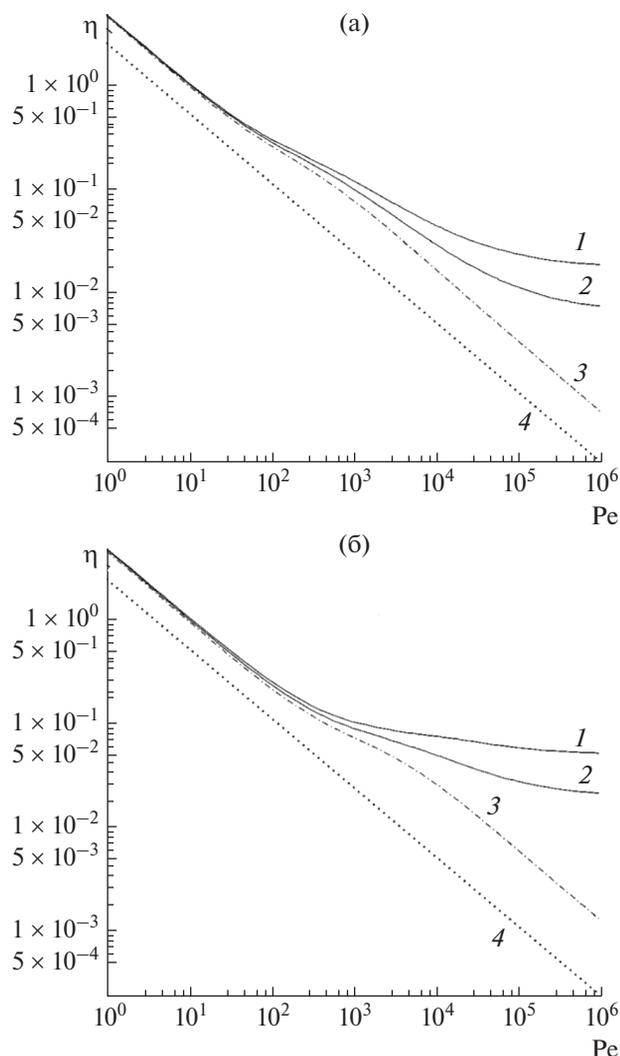


Рис. 14. Зависимости коэффициента захвата частиц композитными волокнами с оболочкой (1–3) с радиусом $\rho = 3$ в ряду с $a_0/h = 0.1$ от Re . (а) $a_f = 0.01a_0$, $\beta = 0.00036$; (б) $a_f = 0.1a_0$, $\beta = 0.036$; 3, 4, 5 – точечные частицы, $R = 0$; 1, 2 – с учетом эффекта зацепления, $R_f = 1$ (1), $R_f = 0.5$ (2); 4 – волокна без оболочки: волокно-стержень радиусом a_0 ,

стоящего из параллельных равноотстоящих композитных волокон, рассчитаны коэффициенты диффузионного захвата наночастиц и частиц конечного размера в зависимости от параметров фильтров и параметров оболочек, от размера частиц и условий фильтрации. Коэффициенты захвата $\eta(Re)$ рассчитаны в зависимости от диффузионного числа Пекле при малых числах Рейнольдса. Показано, что при $Re = 2a_0UD^{-1} < 100$ коэффициенты захвата композитными волокнами с разными параметрами почти не отличаются при одинаковом Re , поскольку осаждение частиц

происходит, в основном, из внешнего потока. Но при больших Re начинается конкуренция разных эффектов, влияющих на коэффициент захвата композитным волокном и его силу сопротивления потоку. Чем больше толщина оболочки и больше расход воздуха через нее и чем выше степень улавливания частиц в оболочке, тем больше коэффициент захвата частиц композитным волокном. При этом возрастает и сила его сопротивления. Поэтому увеличивать толщину оболочки можно до такого размера, при котором еще нет резкой зависимости силы сопротивления волокна от расстояния между волокнами, а для этого исходные фильтры должны быть максимально пористыми. Показано также, что существенно возрастает эффективность фильтра из композитных волокон при улавливании субмикронных частиц, на осаждении которых начинает сказываться их собственный размер. Полученные результаты могут быть использованы для интенсификации процессов массопереноса в волокнистых средах.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят И.Б. Стечкину за ценные замечания, сделанные при знакомстве с рукописью статьи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 18-03-00610.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ПОЛЕ ТЕЧЕНИЯ СТОКСА–БРИНКМАНА ДЛЯ ВОЛОКНА С ПОРИСТОЙ ОБОЛОЧКОЙ

Приведем аналитическое решение задачи о течении вязкой несжимаемой жидкости вблизи волокна (цилиндра) с коаксиальной однородной пористой проницаемой оболочкой в ячейке с граничными условиями Кувабары, полученное в [10, 12], которое может быть использовано для примерных оценок максимально возможных значений сопротивления и эффективности улавливания частиц композитными волокнами с заданными параметрами. В [18] уравнения Стокса и Бринкмана были решены в терминах функции тока:

$$\Psi_1 = (A_1/r + B_1r + C_1r \ln r + D_1r^3) \sin \theta, \quad (\text{П.1})$$

$$\Psi_2 = \left[-A_2 I_1(rS)/S^2 - B_2 K_1(rS)/S^2 + C_2 r/2 + D_2/r \right] \sin \theta, \quad (\text{П.2})$$

где $I_m(z)$ и $K_m(z)$ – модифицированные функции Бесселя, индексы 1 и 2 обозначают соответственно области вне и внутри оболочки, и найдена

формула для силы сопротивления единицы длины волокна с пористой оболочкой

$$F = 4\pi C_1. \quad (\text{П.3})$$

Коэффициенты в (П.1) и (П.2) были найдены в [10, 12] из граничных условий. Они равны:

$$\begin{aligned} D_1 &= -\frac{\alpha C_1}{4}, \\ B_1 &= 1 - \alpha A_1 + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} + \ln \alpha \right) C_1, \\ B_2 &= \frac{S^2}{K_1(S)} \left(D_2 + \frac{C_2}{2} \right) - A_2 \frac{I_1(S)}{K_1(S)}, \\ D_2 &= \frac{A_2}{K_0(S) S^3} - C_2 \left[\frac{1}{2} + \frac{K_1(S)}{SK_0(S)} \right], \\ A_1 &= x_1 C_1, \quad A_2 = x_2 C_1, \quad C_2 = x_3 C_1, \\ C_1 &= \left[(\alpha - 1/\rho^2) x_1 - y_1 + y_2 x_2 + y_3 x_3 \right]^{-1}. \end{aligned} \quad (\text{П.4})$$

Здесь

$$\begin{aligned} y_1 &= 1/4 + 1/2 \ln \alpha + \ln \rho - \alpha \rho^2/4, \\ y_2 &= g_1/\xi^2 - [I_1(\xi) + g_3 K_1(\xi)]/\xi, \\ y_3 &= 1/2 - g_2/\rho^2 + g_1 K_1(\xi)/\rho, \\ g_1 &= 1/SK_0(S), \quad g_2 = 1/2 + g_1 K_1(S), \\ g_3 &= I_0(S)/K_0(S), \\ x_1 &= \rho^3 (\alpha \rho + z_2 x_2 + z_4 x_3)/4, \\ x_2 &= [z_5 x_3 - 2(\alpha \rho + 1/\rho)] \rho/g_1, \\ x_3 &= \frac{[1 - \alpha \rho^2 + 2\rho(z_1 + \rho z_2/2)(\alpha \rho + 1/\rho)]/g_1}{z_3 + \rho z_4/2 + \rho z_5(z_1 + \rho z_2/2)/g_1}, \\ z_1 &= -2g_1/\xi^2 - [I_2(\xi) - g_3 K_2(\xi)]/S, \\ z_2 &= 4g_1/\rho \xi^2 - I_1(\xi) - g_3 K_1(\xi) - 2[K_2(\xi)g_3 - I_2(\xi)]/\xi, \\ z_3 &= 2g_2/\rho^2 - K_2(\xi)/K_0(S), \end{aligned}$$

$$z_4 = 2K_2(\xi)/\rho K_0(S) + SK_1(\xi)/K_0(S) - 4g_2/\rho^3,$$

$$z_5 = S^2(\rho/2 + g_2/\rho),$$

где $\xi = \rho S$, $\alpha = 1 - \varepsilon = a_0^2/b^2$ – плотность упаковки фильтра, ε – пористость фильтра, b – радиус ячейки. Для сравнения с рядом параллельных композитных волокон следует использовать соотношение $\alpha = \pi a_0^2/4h^2$, где $2h$ – расстояние между осями соседних волокон в ряду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фукс Н.А. // Хим. промышленность. 1978. № 11. С. 688.
2. Кириш А.А., Будыка А.К., Кириш В.А. // Рос. хим. журн. 2008. Т. 52. С. 206.
3. Петрянов И.В., Коцеев В.С. Басманов П.И. и др. Лепесток – легкие респираторы. М.: Наука, 1984.
4. Kirsch A.A., Stechkina I.B. // Fundamentals of Aerosol Science. Ed. by Shaw D.T. N.Y.: Wiley-Interscience, 1978. Ch. 4. P. 165.
5. Brewers J.M., Goren S.L. // Aerosol Sci. Technol. 1984. V. 3. P. 411.
6. Park S.J., Lee D.G. // Carbon. 2006. V. 44. P. 1930.
7. Karwa A.N., Tatarchuk B.J. // Sep. Purif. Technol. 2012. V. 87. P. 84.
8. Черняков А.Л., Кириш А.А., Кириш В.А. // Коллоид. журн. 2011. Т. 73. С. 387.
9. Кириш А.А., Бураков А.Е., Ткачев А.Г., Кириш В.А. // Коллоид. журн. 2011. Т. 73. С. 807.
10. Кириш В.А. // Коллоид. журн. 1996. Т. 58. С. 786.
11. Кириш В.А. // Коллоид. журн. 1998. Т. 60. С. 480.
12. Кириш В.А. // Коллоид. журн. 2006. Т. 68. С. 198.
13. Кириш В.А. // Коллоид. журн. 2014. Т. 76. С. 472.
14. Miyagi T. // J. Phys. Soc. Jpn. 1958. V. 13. P. 493.
15. Кириш В.А. // Коллоид. журн. 2003. Т. 65. С. 795.
16. Brinkman H.C. // Appl. Sci. Res. Ser. A. 1947. V. 1. P. 27.
17. Стечкина И.Б. // Изв. АН СССР, МЖГ. 1979. № 6. С. 122.
18. Li H.W., Wu C.Y., Tepper F. et al. // J. Aerosol Sci. 2009. V. 40. P. 65.