

УЛАВЛИВАНИЕ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ ФИЛЬТРАМИ ИЗ ВОЛОКОН, ПОКРЫТЫХ СЛОЯМИ ВИСКЕРОВ

© 2019 г. А. А. Кирш¹, В. А. Кирш^{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: va_kirsch@mail.ru

Поступила в редакцию 19.06.2019 г.

После доработки 01.07.2019 г.

Принята к публикации 05.07.2019 г.

Рассмотрено осаждение субмикронных аэрозольных частиц в модельных волокнистых фильтрах, состоящих из композитных волокон, покрытых коаксиальными пористыми проницаемыми оболочками из тонких вискероов (“усов”), перпендикулярных поверхности волокон. Вычислены гидродинамическое сопротивление композитных волокон и эффективность диффузионного улавливания наноразмерных (точечных) и субмикронных частиц с учетом их конечного размера из трехмерного потока при малых числах Рейнольдса в диапазоне диффузионного числа Пекле $Pe = 1-10^6$. Рассчитан критерий качества фильтра γ – отношение логарифма проскока частиц к перепаду давления на фильтре в зависимости от размера частиц и параметров композитных волокон. Показано, что при фильтрации аэрозолей с субмикронными частицами величина γ фильтров из композитных волокон растет с увеличением Pe , заметно превышает γ для точечных наночастиц и может в несколько раз превышать критерий качества фильтров с волокнами без пористых оболочек.

DOI: 10.1134/S0023291219060077

1. ВВЕДЕНИЕ. О МОДИФИКАЦИИ ФИЛЬТРОВ ПУТЕМ СОЗДАНИЯ СЛОЕВ ВИСКЕРОВ НА ВОЛОКНАХ

Новым направлением интенсификации процесса тонкой фильтрации воздуха может явиться создание на волокнах фильтра высокопористых проницаемых слоев, заметно повышающих эффективность улавливания частиц при незначительном дополнительном увеличении сопротивления потоку. В предыдущем сообщении [1] были рассмотрены общие подходы к проблеме и даны примеры повышения критерия качества фильтров при нанесении на волокна коаксиальных пористых проницаемых оболочек с двумерной (2D) структурой из нановолокон с однородной пористостью. В [1] рассчитано осаждение частиц на композитные волокна в зависимости от параметров фильтров и оболочек и скорости течения воздуха в фильтре для случая диффузионного механизма осаждения точечных и субмикронных частиц с учетом их конечного размера и предсказана возможность многократного увеличения критерия качества фильтра γ . Из полученных результатов следовало, что для увеличения γ необходимо увеличивать проницаемость фильтра путем уменьшения плотности упаковки элементов оболочки

β . (Из-за малой проницаемости оболочек на волокнах, состоящих из нанотрубок, критерий качества в области максимума проскока частиц в работах [2, 3] вырос в полтора раза.) В то же время при уменьшении β падает эффективность задержки частиц в оболочке, так как уменьшается число нановолокон в единице ее объема, и уменьшается коэффициент захвата нановолокном из-за увеличения скорости течения вблизи него.

Таким образом, коэффициент захвата частиц композитным волокном зависит от эффективности улавливания частиц в оболочке и от расхода через оболочку. И задача расчета оптимальных параметров фильтров состоит в нахождении параметров оболочки, соответствующих максимуму γ для фильтра. Однозначный ответ вовсе не очевиден, поскольку задача расчета γ многопараметрическая. Помимо размеров и свойств частиц и условий фильтрации здесь следует учитывать специфику течения при малых числах Рейнольдса, связанную с дальнедействующим взаимным влиянием соседних волокон с оболочками в фильтре и взаимным влиянием нановолокон в оболочке.

Развитый в [1] подход к модификации волокон в фильтре может быть использован и для нахождения оптимальных параметров оболочки с неод-

нородной по радиусу пористостью. Например, для случая радиально ориентированных слоев наноразмерных вискерев, технология получения которых на волокнах непрерывно развивается [4]. Метод интенсификации процесса фильтрации газов впервые упоминается в работе [5]. Ее авторы обратили внимание на то, что по данным [6] эффективность улавливания субмикронных частиц в фильтре РС-1478, разработанном американским Институтом химии бумаги и состоящем из грубых целлюлозных волокон диаметром 17–19 мкм, начинала возрастать при малых значениях инерционного числа Стокса, соответствующих не грубым целлюлозным волокнам, а субмикронным волокнам. Кроме того, по данным химического анализа, в составе фильтрующего материала было обнаружено в десятки раз большее содержание натрия по сравнению с другими целлюлозными фильтрами [7]. Избыток натрия, несоответствие экспериментальных результатов теории инерционного осаждения и высокое качество этих грубодисперсных фильтров, как оказалось, объясняются присутствием осколков ультратонких стеклянных волокон, прикрепленных к целлюлозным волокнам в середине слоя фильтра. Это было обнаружено авторами [5] под оптическим микроскопом. Также заметный рост эффективности улавливания грубодисперсных частиц в инерционном режиме при $Re > 1$ был продемонстрирован в экспериментальной работе [8], где в качестве фильтров использовались металлические сетки, на которых выращивали оболочки из тонких иглоочек – вискерев (“усов”).

В связи с перспективностью использования фильтров из волокон с оболочками не только для высокоскоростной аналитической фильтрации, но и в обычных условиях, особенно для респираторов, а также в связи с возможностью создания на субмикронных волокнах оболочек с регулируемой толщиной, в том числе из вискерев нанометрового диаметра из разных материалов [4], необходимо подробнее выяснить, как зависит осаждение частиц в оболочке от ее параметров и условий фильтрации. Напомним, что данная задача рассматривается для вязкого стоковского течения в условиях сильного взаимного влияния композитных волокон и взаимного влияния вискерев в оболочке на поле течения и сопротивление потоку. Но, в отличие от оболочек из нановолокон с однородной пористостью, осаждение на которые в предыдущей работе [1] рассматривалось на основе плоского двумерного течения, в случае оболочек из радиально расположенных на волокне вискерев задача усложняется, и осаждение частиц рассчитывается в условиях трехмерного течения.

В качестве модельного фильтра рассмотрим перпендикулярный направлению потока ряд параллельных волокон с коаксиальными оболочка-

ми. Как отмечалось ранее [5], изолированный ряд волокон является удачной моделью реального фильтра, и его свойства полностью совпадают со свойствами модельного фильтра с гексагональной упаковкой волокон. Учитывая результаты [1], где подчеркивалась важность выбора исходного фильтра с минимально возможными значениями плотности упаковки α и плотности оболочки β , рассмотрим разреженный ряд волокон с параметром $\alpha^{1/2} \approx a_0/h = 0.1$, где a_0 – радиус волокна, $2h$ – расстояние между осями волокон в ряду. Будет проанализировано влияние толщины и пористости оболочки из радиальных вискерев на поле течения в системе композитных волокон, сопротивление потоку и эффективность улавливания нано- и субмикронных частиц, и показана возможность увеличения критерия качества фильтра путем создания на его волокнах высокопористых слоев нановискерев.

2. КРИТЕРИЙ КАЧЕСТВА ФИЛЬТРА ПРИ ДИФФУЗИОННОМ ОСАЖДЕНИИ ЧАСТИЦ

Коэффициент диффузионного захвата волокон точечных частиц в модельных системах параллельных волокон, перпендикулярных потоку, при $Pe \gg 1$ и $Re < 1$ рассчитывается по формуле [9, 10]

$$\eta_0 = 2.9k^{-1/3}Pe^{-2/3} + 0.624Pe^{-1}, \quad (1)$$

где $Pe = 2a_0U/D$ – диффузионное число Пекле, $2a_0$ – диаметр волокна, U – скорость невозмущенного течения перед фильтром, D – коэффициент диффузии частиц, k – гидродинамический фактор, связанный с безразмерной силой сопротивления единицы длины волокна, $k = 4\pi/F$. Для изолированного ряда волокон $k = \left(\frac{1}{2} - \ln 2t + \frac{1}{3}t^2 - \frac{1}{18}t^4 + \frac{4}{135}t^6 - \frac{53}{2700}t^8 + \dots\right)$, где $t = \pi a_0/2h$, $2h$ – расстояние между волокнами в ряду [11]. Для гексагональной решетки волокон с плотностью упаковки α $k = -0.5 \ln \alpha - 0.75 + \alpha - 0.25\alpha^2$ [12].

Коэффициент захвата в общем случае связан с проскоком частиц через фильтр соотношением

$$n/n_0 = \exp(-2a_0L\eta),$$

где n и n_0 – концентрация частиц за фильтром и до фильтра, L – длина волокон, проходящихся на единицу площади фильтра. Для фильтра с толщиной H длина волокон равна $L = \alpha H/\pi a_0^2$, а для одного ряда волокон $L = (2h)^{-1}$. Перепад давления на фильтре равен $\Delta p/\mu U = FL$, где μ – вязкость воздуха. Критерий качества удобно характеризовать отношением логарифма проскока частиц к перепаду давления или отношением доли частиц,

Таблица 1. Сравнение значений критерия качества γ_0 (см) модельного фильтра из безоболочечных волокон с разными значениями a_0/h . $U = 20$ см/с, $2a_0 = 10$ мкм, $r_p = 0.1$ мкм, $D = 2.2 \times 10^{-6}$ см²/с

№	a/h	a/a_0	F_0	Re	$\eta_0 \times 10^3$	$\gamma_0 \times 10^7$
1	0.1	1	7.54	9090	5.62	7.4
2	0.3	1	19.91	9090	7.75	3.9
3	0.3	3	19.91	27270	3.72	5.6
4	0.2	1	12.60	9090	6.66	5.3
5	0.6	1	98.60	9090	13.23	0.13
6	0.6	3	98.60	27270	6.40	0.65

осевших из набегающего потока на волокно, к силе сопротивления волокна [5]:

$$\gamma = -\ln(n/n_0)/(\Delta p/U\mu) = 2a_0\eta/F, \quad (2)$$

где $a_0\eta$ – размерная величина. В табл. 1 приведены примеры расчета значений критерия качества (γ_0) для ряда волокон без оболочек.

Из данных табл. 1 следует, что при увеличении радиуса волокна при постоянном расстоянии между осями волокон возрастают как сила сопротивления, так и коэффициент захвата волокном точечных частиц за счет диффузии. При этом F_0 растет быстрее, чем η_0 , и, следовательно, увеличение плотности упаковки системы волокон в диапазоне реальных значений $\alpha > 0.001$ ведет к уменьшению критерия качества γ_0 . Это подробно обсуждалось еще в [13]. Видно также, что γ_0 уменьшается при увеличении a_0 тем быстрее, чем больше α . При этом, сравнивая осаждение одинаковых частиц при одинаковой скорости (примеры 1 и 3), следует учесть, что значения γ соответствуют разным величинам Re. Вывод для фильтров из сплошных волокон относится также к фильтрам из композитных волокон с проницаемыми оболочками в условиях, когда осаждение частиц целиком определяется только внешним диффузионным потоком частиц. Добавим, что в случае более крупных частиц, для которых учитывается не зависящий от скорости эффект зацепления, различие в значениях критерия качества с ростом Re и толщины волокон будет еще заметнее, поскольку резко уменьшается коэффициент захвата волокна без оболочки, учитывающий зацепление, $\eta_R \approx r_p^2/ka_0^2$. Поэтому при выращивании вискером и стремлении увеличить коэффициент захвата за счет роста потока через оболочку первым условием выбора исходных фильтров является максимально высокая их пористость $1 - \alpha$. Подчеркнем при этом, что надежда на то, что с ростом толщины оболочек увеличится расход в оболочке из-за увеличения степени стесненности течения между композитными волокнами, не оправдывается. Дело в том, что при $Re < 1$ соседние композитные волокна с оболочками при

сближении слабо влияют на расход через оболочку, но существенно увеличивают перепад давления. Следовательно, модификация волокон имеет смысл, только если с ростом толщины проницаемой оболочки рост сил сопротивления отстает от роста коэффициента захвата волокна с оболочкой.

3. МОДЕЛЬ КОМПОЗИТНОГО ВОЛОКНА

Гидродинамика систем параллельных волокон с однородными пористыми проницаемыми оболочками впервые была исследована в рамках модели Стокса–Бринкмана в работах [14–16], где были найдены двумерные поля течения. В настоящей работе рассматриваются оболочки с заданной трехмерной микроструктурой с неоднородной проницаемостью.

На рис. 1 показана расчетная ячейка для решения задачи о течении потока вязкой несжимаемой жидкости и о распределении концентрации взвешенных частиц в ряду параллельных волокон, покрытых пористыми проницаемыми оболочками, где ρ – безразмерный радиус волокна с оболочкой, $(\rho - 1)$ – толщина оболочки. Все размеры даны в единицах радиуса волокна без оболочки a_0 . Здесь же показана структура оболочек, состоящих из вискером цилиндрической формы с площадью кругового сечения πa_f^2 и высотой, равной толщине оболочки $\rho - 1$, где a_f – безразмерный радиус вискера. Радиально ориентированные вискером расположены равномерно вокруг волокон в параллельных слоях, перпендикулярных поверхности волокна. Расстояние между соседними слоями вискером равно ξ . Число вискером в ячейке равно N . Четные и нечетные ряды вискером на волокне смещены вокруг волокна на половину угла между вискером в ряду. Плотность упаковки оболочки с вискером $\beta = v/V$, где $v = N\pi a_f^2(\rho - 1)$ – суммарный объем вискером в слое, $V = \pi\xi(\rho^2 - 1)$ – объем одного слоя толщиной ξa_0 , с учетом чего

$$\beta = N a_f^2/\xi(1 + \rho). \quad (3)$$

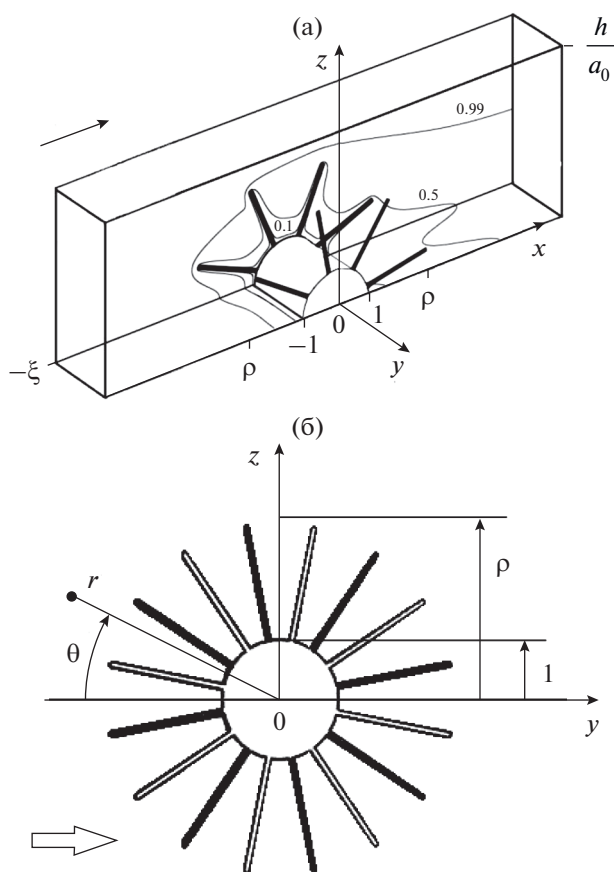


Рис. 1. Схема расчетной ячейки: (а) изолинии концентрации частиц при поперечном обтекании волокна в ряду параллельных волокон, покрытых высокопористыми слоями нановискеров, (б) – поперечное сечение композитного волокна.

Поля течения и концентрации частиц находились совместным численным решением стационарных уравнений Стокса

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

и уравнения конвективной диффузии

$$2\text{Pe}^{-1} \Delta n - \mathbf{u} \cdot \nabla n = 0,$$

где $p = p^* a_0 / U \mu$ и $\mathbf{u} = \mathbf{u}^* / U$ – безразмерные давление и скорость потока, $n = n^* / n_0$ – безразмерная концентрация, звездочка обозначает размерные переменные, Δ – оператор Лапласа, ∇ – оператор набла, $\mathbf{u} = \{u, v, w\}$ – вектор скорости потока, $\mathbf{u} \cdot \nabla n \equiv u \partial n / \partial x + v \partial n / \partial y + w \partial n / \partial z$. На поверхности волокон ставились условия прилипания $\mathbf{u} = 0$ и полного поглощения $n = 0$. На входной границе ячейки ставились условия невозмущенного потока $\mathbf{u} = \{1, 0, 0\}$ и однородной концентрации $n = 1$, на выходе – условия отсутствия вязких напряжений и выравнивания концентрации $\partial n / \partial x = 0$. На боковых гранях ячейки

ставились условия симметрии для концентрации и компонент скорости. Ширина и высота расчетной ячейки ограничены расстояниями ξ и h/a_0 . Длина ячейки подбирается из условия, чтобы ее дальнейшее увеличение не влияло на рассчитываемые с заданной точностью F и η . Безразмерная сила сопротивления волокна с оболочкой находилась как $F = \int_S T_x d\Sigma$, 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 – суммарная площадь поверхности волокна и вискеро-в. Коэффициент захвата частиц композитным волокном рассчитывался как $\eta = \int_S j_n d\Sigma$, где j_n – плотность нормального диффузионного потока частиц на поверхность волокна с вискерами. Коэффициент захвата частиц волокном с оболочкой связан с проскоком частиц через ряд волокон как

$$n/n_0 = 1 - 2a_0 L \eta = 1 - (a_0/h) \eta,$$

где $L = 1/2h$ – длина волокон на единице площади.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Поле течения в ряду композитных волокон

В работе все расчеты выполнены для ряда волокон с параметром $a_0/h = 0.1$. На рис. 2 приведены примеры зависимостей продольной компоненты скорости течения в ряду композитных волокон от радиальной координаты при $\theta = \pi/2$. Видно, что скорость течения в высокопористой оболочке даже между слоями вискеро-в оказывается на один-два порядка меньше, чем скорость вне оболочки. В оболочку проходит лишь небольшая доля общего потока. При этом поток, попадающий в оболочку, должен априори эффективно очищаться, поскольку коэффициент захвата частиц вискерами чрезвычайно велик из-за малой скорости потока в оболочке (случай малых чисел Пекле).

Следующий рис. 3 позволяет судить об относительной величине расхода среды через оболочку. Видно, что наибольшее сопротивление потоку в оболочке оказывают вискеры, расположенные в области $\theta = \pi/2$, где скорость течения в зазоре между соседними волокнами в ряду и в оболочке максимальна. Заметим, что большая часть вискеро-в обтекается не продольным или поперечным, а трехмерным потоком. И, несмотря на очень большую пористость слоя, особенно около внешней границы оболочки, среда почти не проникает к поверхности центрального волокна.

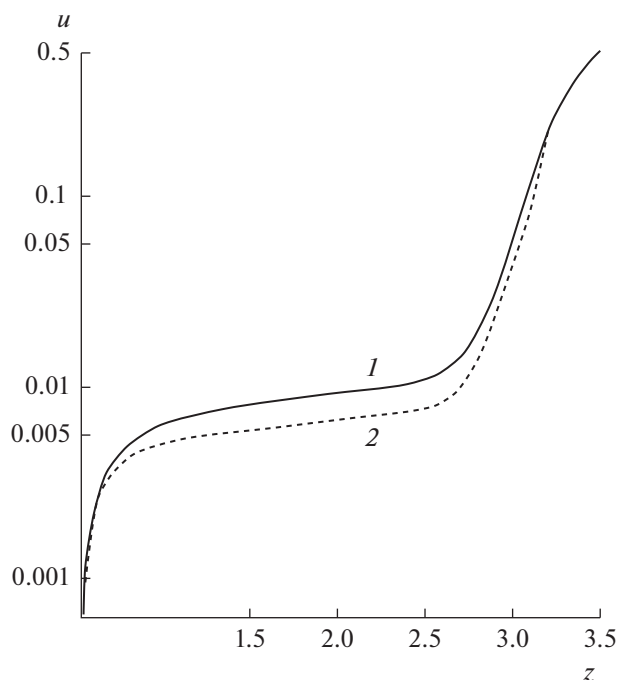


Рис. 2. Профили продольной компоненты скорости вблизи композитного волокна с пористой оболочкой с $\rho = 3$, $N = 16$, $a_f = 0.01$, $\xi = 0.2$, $a_0/h = 0.1$ на оси Oz при $x = 0$ и $y = 0$ (1), $y = \xi/2$ (2).

Сила сопротивления композитного волокна

Результаты расчета безразмерной силы сопротивления единицы длины композитного волокна с оболочкой из вискерев, расположенных перпендикулярно волокну и образующих гексагональную структуру с плотностью упаковки β , приведены на рис. 4. Из них следует, что даже очень пористая оболочка при $\rho < 2$ снижает сопротивление композитного волокна всего на 10%. Таким образом, пористый слой обтекает почти как непроницаемый.

На рис. 5 приводится сравнение роста силы сопротивления композитных волокон от толщины оболочки с 3D-структурой из вискерев с вдвое различающимися значениями β (вдвое различается количество вискерев в слое), откуда следует, что сила сопротивления всего композитного волокна почти не изменяется. Для сравнения приведен рост сопротивления композитного волокна с однородной по толщине пористой оболочкой с 2D-структурой, имеющей пористость в 20 раз большую. Видно, что даже при столь малой величине β сопротивление композитного волокна уменьшается незначительно. Интересно отметить, что при заметном утолщении оболочки на композитном волокне сила сопротивления внутреннего волокна остается почти постоянной (рис. 6).

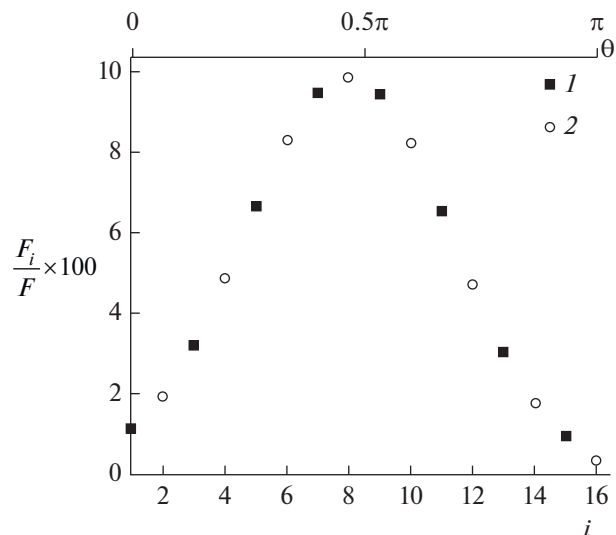


Рис. 3. Силы сопротивления отдельных вискерев F_i , отнесенные к общей силе сопротивления композитного волокна F , для вискерев, расположенных в соседних параллельных слоях (по 8 вискерев в каждом слое) с зазором $\xi = 0.2$ при $y = -\xi$ (1), $y = 0$ (2); i – номер вискера в слое; $\rho = 3$, $a_f = 0.05$.

Коэффициент захвата точечных частиц композитным волокном

Распределение концентрации частиц внутри и вблизи оболочки на оси Oz для разных значений Re показано на рис. 7 и рис. 8, из которых следует, что концентрация частиц резко падает почти до нуля вблизи внешней поверхности оболочки, т.е. что частицы почти не проникают между слоями вискерев. И только при $Re = 2 \times 10^4$ частицы проникают на расстояние чуть большее половины радиуса оболочки.

Более наглядно проникновение частиц в оболочку при больших Re иллюстрируют поля концентраций, рассчитанные в плоскостях $x-z$, проходящих посередине между слоями вискерев при $y = \xi/2$ и через оси вискерев при $y = 0$ (рис. 8). Изолинии при $Re = 2 \times 10^4$ проходят ближе к поверхности волокна, тогда как при $Re = 200$ все вошедшие с потоком частицы успевают осесть в наружном слое оболочки. Этот результат аналогичен полученному при моделировании осаждения частиц в оболочке с 2D-структурой [1], когда при $Re < 1000$ доля осевших частиц определялась внешним потоком и роль оболочки была незначительной.

Для композитных волокон с $\rho = 3$ распределение долей (относительно коэффициента захвата волокна с оболочкой) частиц, осевших на вискеры, в зависимости от номера вискера в слое (от полярного угла в пределах $\theta = 0-\pi$) в двух параллельных соседних слоях с $N = 16$ при $Re = 20 - 2 \times 10^4$ дано на рис. 9. Видно, что изменение коэффици-

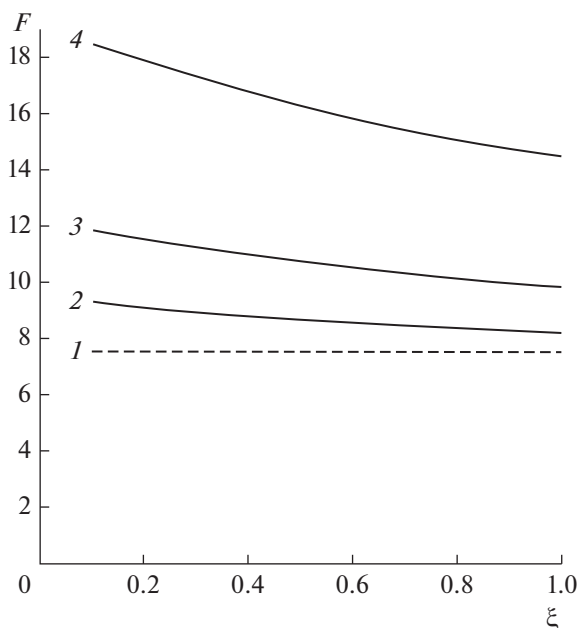


Рис. 4. Зависимости силы сопротивления композитных волокон с разной толщиной оболочки от расстояния между рядами вискеров в оболочке: $\rho = 1$ (1), 1.5 (2), 2 (3), 3 (4); $N = 8$, $a_f = 0.05$.

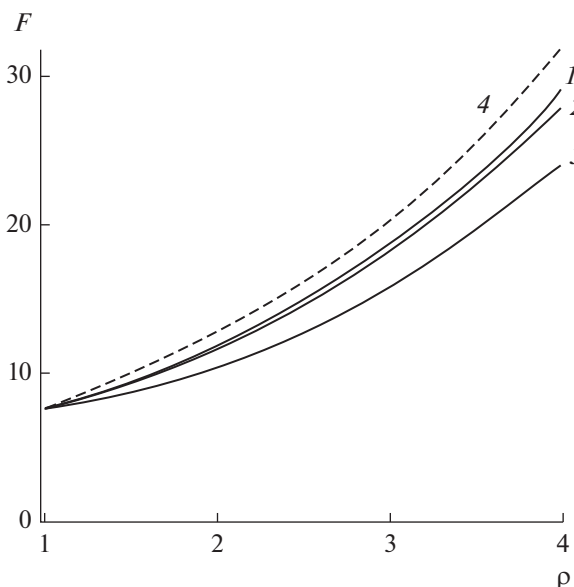


Рис. 5. Зависимости силы сопротивления композитных волокон от радиуса оболочки ρ при фиксированном значении h : 1, 2 – оболочка из вискеров с $\xi = 0.2$, 3 – оболочка с 2D-структурой из параллельных волокон с $\beta = 3.6 \times 10^{-4}$ [1], 4 – эквивалентное непроницаемое волокно; 1 – $N = 16$, $a_f = 0.01$, 2 – $N = 8$, $a_f = 0.05$.

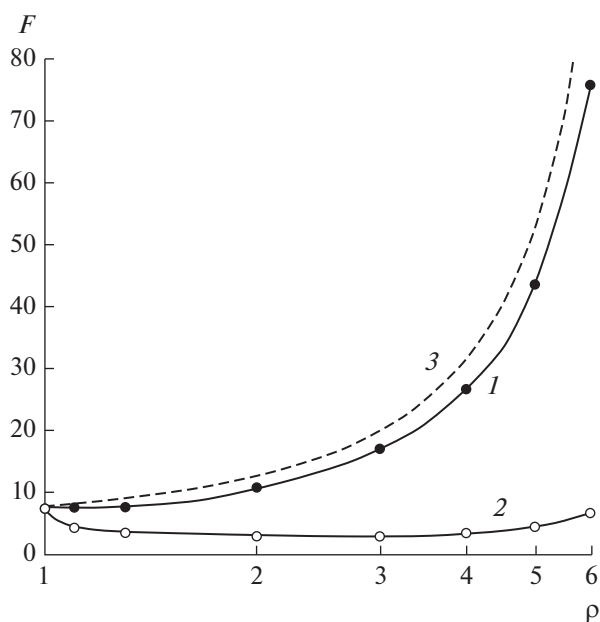


Рис. 6. Зависимости силы сопротивления композитного волокна с $N = 16$, $a_f = 0.01$, $\xi = 0.3$ (1) и внутреннего волокна-стержня, окруженного оболочкой (2), от толщины оболочки; 3 – непроницаемое волокно с радиусом, равным ρ .

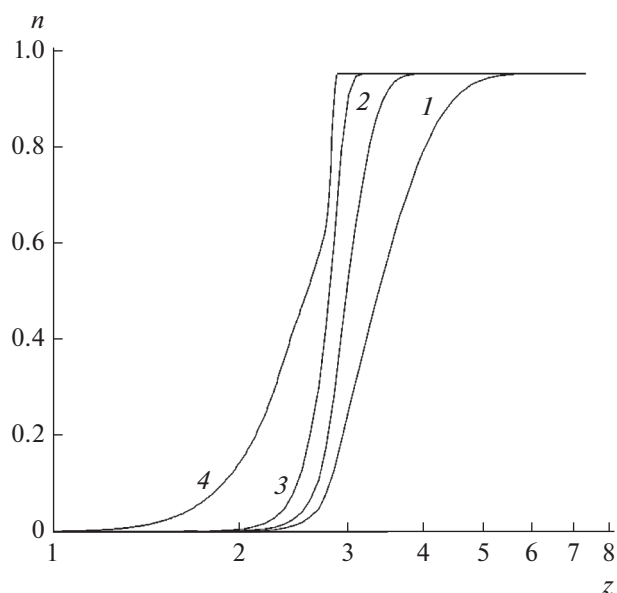


Рис. 7. Профили концентрации частиц по оси Oz при $x = 0$, $y = 0$ ($\theta = \pi/2$) в оболочке с $\rho = 3$, $\xi = 0.2$, $a_f = 0.05$ для значений $Pe = 20$ (1), 2×10^2 (2), 2×10^3 (3), 2×10^4 (4).

ента захвата при осаждении частиц из потока, проходящего через оболочку, не соответствует обычному экспоненциальному убыванию по тол-

щине фильтра, поскольку коэффициенты захвата частиц отдельными вискерами различаются. Это объясняется тем, что скорость 3D-течения в обо-

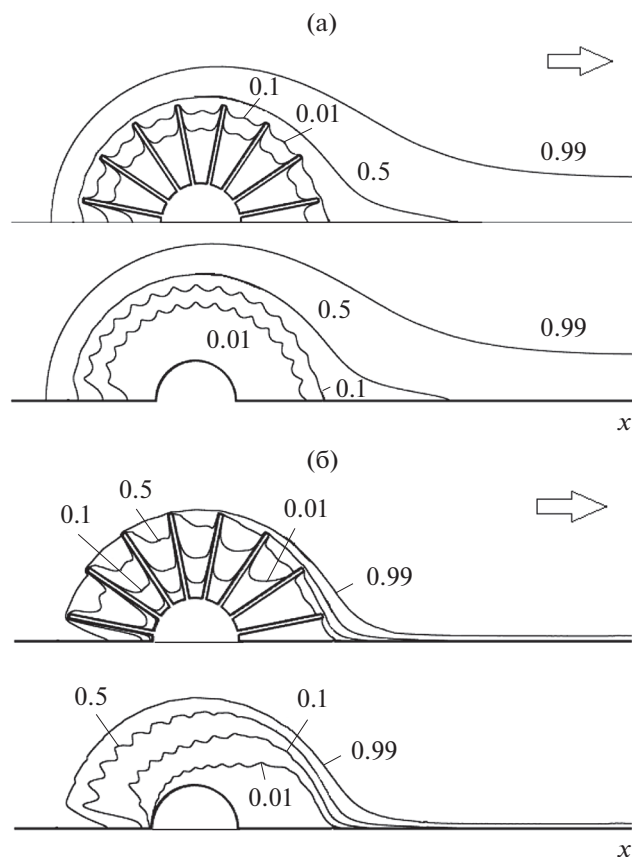


Рис. 8. Изолинии концентрации частиц при значениях $Re = 2 \times 10^2$ (а, б) и 2×10^4 (в, г) для композитных волокон с $N = 8$, $\xi = 0.2$, $a_f = 0.05$ и $\rho = 3$, рассчитанные в плоскости слоя вискеро́в (а, в) и между слоями вискеро́в (б, г). Стрелкой указано направление потока.

лочке изменяется по ее толщине сложным образом из-за различного расположения вискеро́в относительно направления потока, что влияет на режим осаждения частиц.

Влияние толщины и пористости оболочки

На рис. 10 даны кривые зависимостей коэффициента захвата композитного волокна от Re для разных значений ξ и двух значений ρ , иллюстрирующие влияние пористости и толщины оболочки на эффективность осаждения точечных частиц.

Прежде всего, обратим внимание на характер осаждения при $Re < 1000$, когда коэффициент захвата η определяется в основном осаждением частиц из внешнего потока, в результате чего его значение мало отличается от значения η для эквивалентного непроницаемого волокна. В этой области чисел Re кривые, относящиеся к разным β , пересекаются между собой, но, затем, при $Re \approx 10^4$, когда осаждение идет в глубине оболочки, и полнота осаждения зависит от числа вискеро́в, коэффи-

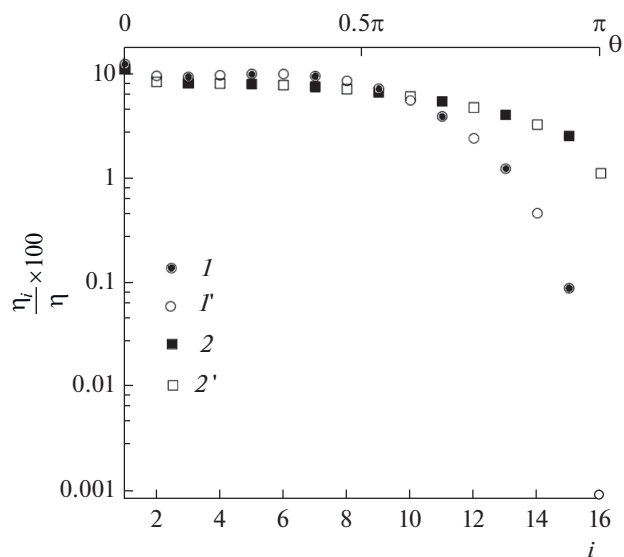


Рис. 9. Доля частиц, осевших на вискеро́в, в зависимости от номера i вискеро́в на волокне (полярного угла θ) в двух соседних параллельных слоях в плоскости $x-z$ на композитных волокнах с $\rho = 3$ при $Re = 20$ (1, 1') и 2×10^4 (2, 2'); $y = 0$ (1, 2), $y = \xi/2$ (1', 2'); $\xi = 0.2$, $N = 16$, $a_f = 0.01$.

циент захвата возрастает, причем тем больше, чем ближе слои вискеро́в расположены друг к другу, т.е. чем плотнее оболочка. При $Re > 10^4$ коэффициент захвата композитного волокна возрастает в несколько раз, причем максимум η в этой области Re достигается при разных значениях ρ , соответствующих наибольшему вкладу от оболочки, который определяется расходом через оболочку и полнотой улавливания в ней частиц.

Влияние толщины оболочки при ее неизменной структуре на осаждение точечных частиц показано на рис. 11. Из этого рисунка следует, что во всем диапазоне значений Re осаждение на композитное волокно тем больше, чем длиннее вискеро́в, и что с ростом Re роль оболочки усиливается.

Критерии качества фильтров с оболочками при осаждении точечных частиц

На рис. 12 для разных значений плотности упаковки оболочек при $\xi = 0.1-1$ представлены зависимости критерия качества γ от Re . Отметим, что в столь широком диапазоне значений Re величины γ различаются незначительно. Как и в случае сплошных волокон без оболочек (табл. 1), критерий качества при $Re < 10^3$ уменьшается с ростом радиуса волокна, в данном случае — с ростом толщины оболочки, поскольку основной вклад в коэффициент захвата дает осаждение частиц из внешнего потока. И только при $Re > 10^3$ на величине коэффициента захвата начинает сказываться осаждение внутри оболочки.

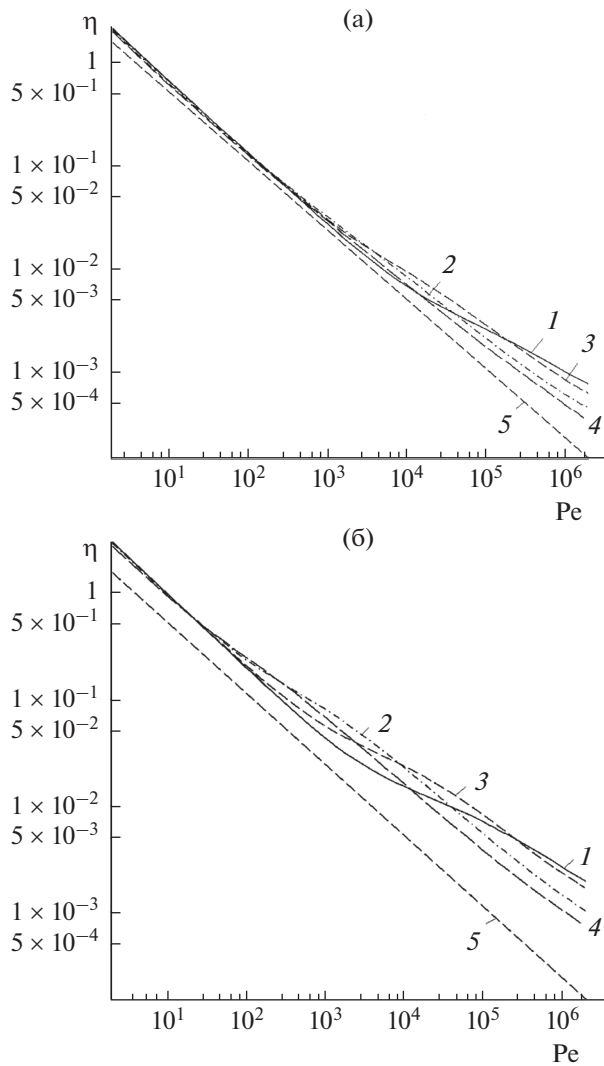


Рис. 10. Зависимости коэффициента захвата точечных частиц композитным волокном с разным расстоянием между слоями вискеро́в на волокне ξ от числа Пекле. $\xi = 0.1$ (1), 0.2 (2), 0.5 (3), 1 (4); 5 – волокно-стержень без оболочки; $a_f = 0.05$, $N = 8$; $\rho = 1.5$ (а) и 3 (б).

Таким образом, при осаждении наночастиц в точечном приближении в диапазоне $Pe < 10^3$ оболочки не дают эффекта. Только при больших Pe их роль становится заметной, при этом неравенство $\gamma \leq \gamma_0$ сохраняется до тех больших значений Pe , чем больше пористость оболочки. Но и при больших $Pe = 10^4 - 10^6$ после точки пересечения кривых 1, 2, 3 критерий качества γ с ростом ρ возрастает незначительно. Эффект от оболочек должен существенно возрасти в области больших Pe при диффузионном осаждении субмикронных частиц конечного размера.

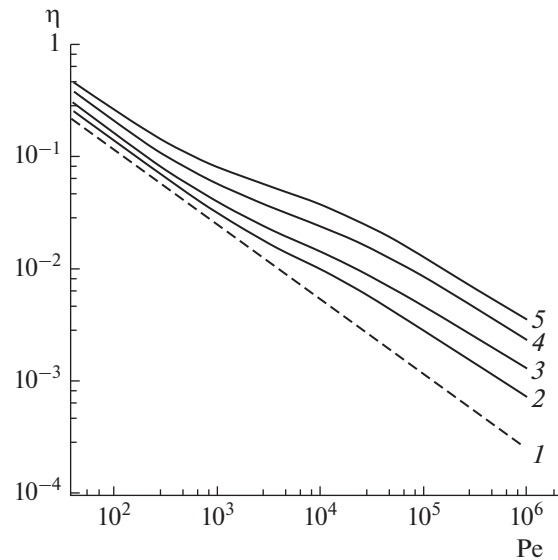


Рис. 11. Зависимости коэффициента захвата точечных частиц композитными волокнами с разным внешним радиусом оболочки ρ от числа Пекле. $\rho = 1$ (1), 1.5 (2), 2 (3), 3 (4), 4 (5); $a_f = 0.05$, $N = 8$, $\xi = 0.2$.

Осаждение частиц конечного размера

При вычислении η безынерционных частиц конечного размера следует учитывать эффект зацепления, который увеличивается с ростом размера частиц, в то время как диффузионная подвижность частиц падает. Таким образом, зависимость эффективности осаждения от размера частиц при постоянной скорости проходит через минимум.

На рис. 13 представлены зависимости коэффициента захвата частиц композитными волокнами в ряду от радиуса частиц, рассчитанные при фиксированной скорости для волокон с разной толщиной оболочек. В данном случае эффект зацепления частиц при осаждении на волокно без оболочки начинает сказываться лишь при $Pe > 10^3$, когда величина η_D становится малой и соизмеримой с η_R . Роль зацепления существенно возрастает при осаждении этих же частиц на вискеро́в в оболочках, что ведет к резкому увеличению осаждения в оболочке и, тем самым, к росту коэффициента захвата композитного волокна. Для сравнения на рис. 13 приведены также зависимости η от r_p для волокон без оболочек и эквивалентных по радиусу непроницаемых волокон (кривые 1 и 2).

Для расчета коэффициента захвата волокнами без оболочек η_0 при малых параметрах зацепления $R = r_p/a_0 \ll 1$ использовалась формула, применимая для изолированного ряда волокон и для ячеечной модели [5],

$$\eta = \eta_D + \eta_R + \eta_{DR},$$

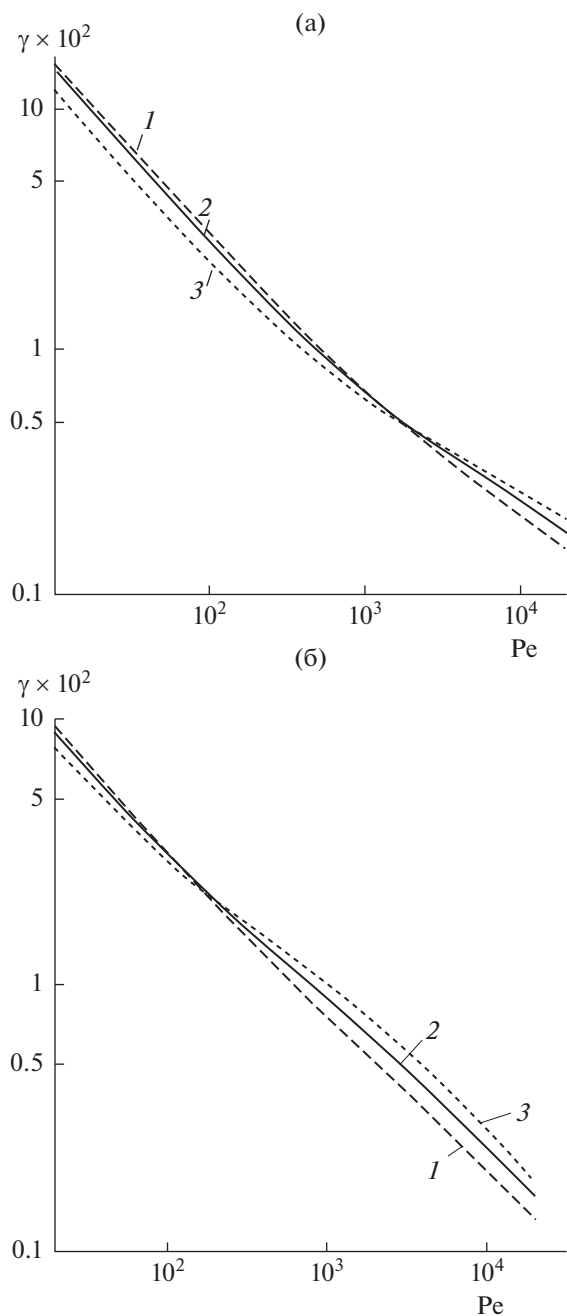


Рис. 12. Зависимости критерия качества от Pe для фильтров из композитных волокон с радиусом оболочки $\rho = 1.5$ (1), 2 (2), 3 (3) и $\xi = 0.2$ (а) и 0.5 (б); $a_f = 0.05$, $N = 8$.

где $\eta_D = 2.9k^{-1/3}Pe^{-2/3}$, $\eta_{DR} = 1.24k^{-1/2}R^{2/3}Pe^{-1/2}$, $\eta_R = R^2k^{-1}(1 + 2\tau Kn_p)$. Здесь индексы D, R и DR обозначают коэффициенты захвата за счет диффузии точечных частиц, зацепления недиффундирующих частиц конечного размера, и поправку к диффузионному коэффициенту захвата на зацепление частиц конечного размера, $Kn_p = \lambda/r_p$,

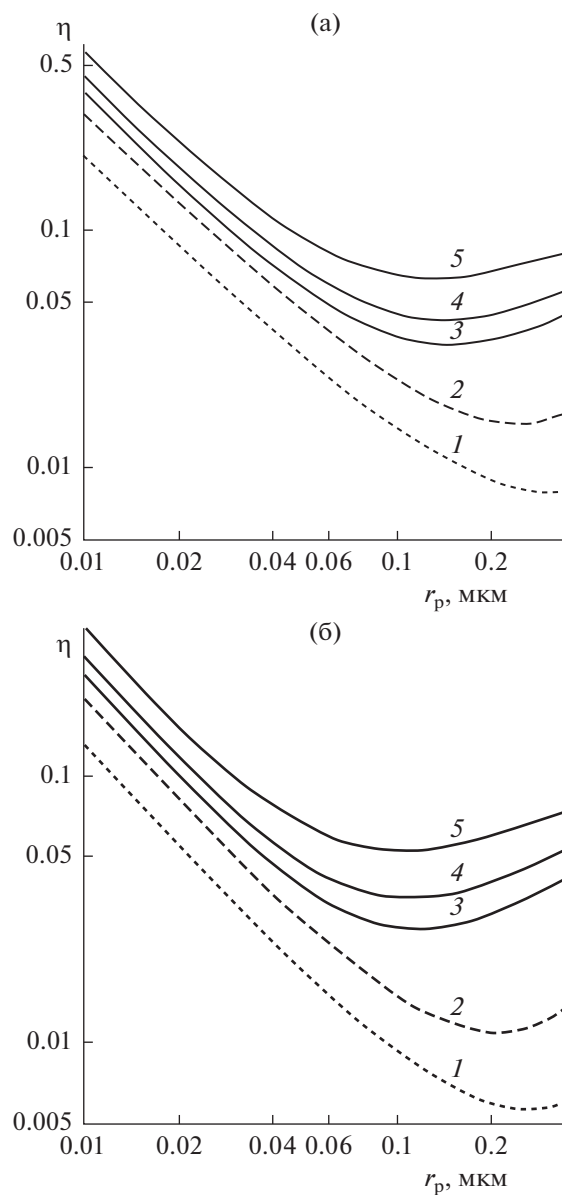


Рис. 13. Зависимости коэффициента захвата от радиуса частиц r_p при скорости $U = 5$ (а) и 10 см/с (б) для волокон без оболочки с $2a_0 = 6$ (1) и 18 мкм (2) и композитных волокон с параметрами оболочек: $\xi = 0.2$, $\rho = 1.5$ (3), 2 (4) и 3 (5), $N = 8$ (3–5); $a_f = 0.05$.

$\lambda = 0.065$ мкм — средняя длина свободного пробега молекул воздуха при нормальных условиях, $\tau = 1.15$, $k = 4\pi/F$.

Как видно на рис. 13, в области минимума зависимости $\eta(r_p)$ значения η композитных волокон значительно превышают η волокон без проникаемых оболочек, причем тем существеннее, чем больше ρ . Следует отметить, что приведенная здесь нижняя оценка эффективности осаждения частиц конечного размера получена без учета эффекта скольжения газа на тонких вискерах в обо-

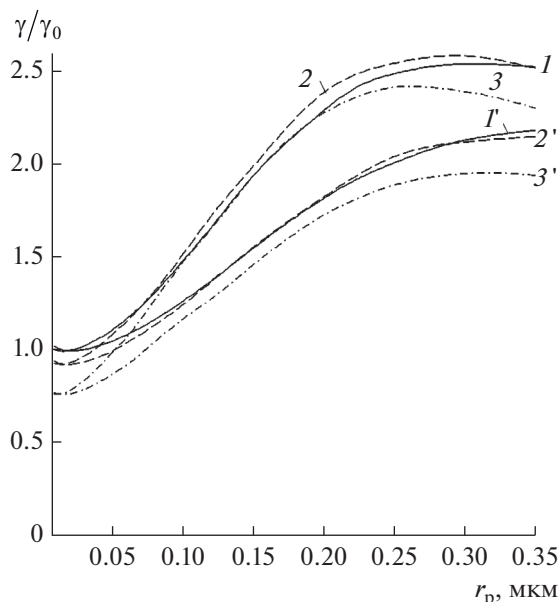


Рис. 14. Зависимости отношения критериев качества модельных фильтров из композитных волокон γ и фильтров из волокон без оболочек γ_0 от r_p при $2a_0 = 6$ мкм. $\rho = 1.5$ (1, 1'), 2 (2, 2') и 3 (3, 3'); $U = 10$ (1–3) и 5 см/с (1'–3'); $N = 8$, $a_f = 0.05$.

лочке и ван-дер-ваальсова притяжения частиц к вискерам. И, тем не менее, коэффициент захвата для композитных волокон вырос в несколько раз по сравнению с η волокон без оболочек.

Сравнение критериев качества для субмикронных частиц

На рис. 14 сопоставлены критерии качества модельных фильтров из композитных волокон и фильтров из волокон без оболочек при варьировании радиуса частиц. Зависимости отношения критериев качества γ/γ_0 от r_p рассчитаны при двух значениях скорости U . Видно, что в области $Re < 10^3$, в которой коэффициент захвата композитным волокном определяется осаждением наночастиц из внешнего потока, значения γ/γ_0 для волокон с оболочкой даже меньше, чем для волокон без оболочки, но при осаждении субмикронных частиц при больших Re это отношение возрастает более чем вдвое. Видно также, что максимум γ/γ_0 в зависимости от ρ в данном случае имеет неявный характер. При разной скорости и для разных размеров частиц этот максимум соответствует разным значениям ρ . Отметим еще раз, что в качестве примера были рассмотрены композитные числа грубодисперсных вискером. Но даже в этом случае наглядно показано преимущество волокон с пористыми оболочками, особенно при улавливании субмикронных частиц.

В заключение обратим внимание на то, что до сих пор рассматривался критерий качества γ в зависимости от толщины и пористости оболочки, который сравнивался с γ_0 для исходных немодифицированных тонких волокон. Но еще больший эффект от модификации поверхности волокон достигается, если сравнивать значения γ для фильтров с одинаковыми по толщине волокнами, в одном из которых в результате химической или термообработки создается пористый проницаемый слой, или если волокна в нем полностью пористые или состоят из неплотных жгутов параллельных еще более тонких волокон. Это было показано в рамках модели Стокса–Бринкмана в [15]. Для сравнения на рис. 13 приводится кривая зависимости η от r_p для непроницаемых волокон с радиусом, равным внешнему радиусу композитных волокон с $3r$. В рассмотренном случае значения гидродинамического сопротивления пористого и сплошного волокон при $Re \ll 1$ различаются незначительно, тогда как η и η_0 различаются на порядок, и отношение η/η_0 почти однозначно характеризует рост критерия качества.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен один из способов интенсификации процесса тонкой фильтрации аэрозолей путем модификации поверхности волокон в фильтре. Исследовано осаждение субмикронных аэрозольных частиц в модельных волокнистых фильтрах из композитных волокон, на поверхности которых имеются коаксиальные проницаемые оболочки, состоящие из тонких вискером, расположенных перпендикулярно поверхности волокон. Рассчитаны силы сопротивления композитных волокон F и коэффициенты захвата точечных частиц η в зависимости от диффузионного числа Пекле в диапазоне $Pe = 1-10^6$ с учетом дискретности структуры оболочки, т.е. с учетом обтекания трехмерным потоком отдельных вискером в оболочке и осаждения частиц на них. Трехмерные поля течения и концентрации получены совместным численным решением стационарных уравнений Стокса и конвективной диффузии. Показано, что значения силы сопротивления волокон с оболочками толщиной, большей радиуса волокна, и с малой плотностью упаковки $\beta > 0.01$ незначительно отличаются от значений силы сопротивления непроницаемых волокон эквивалентного диаметра.

Установлено, что величина критерия качества фильтра, определяемая как отношение логарифма проскока частиц к перепаду давления на фильтре из композитных волокон с оболочками из вискером, возрастает с ростом толщины оболочки только при больших Re , когда существенным становится вклад от очищаемой доли потока, проходящей через оболочку. Как и в случае модельных

фильтров из композитных волокон с оболочкой с 2D-полем течения [1], наибольший эффект от оболочек в виде вискероов достигается при больших Re , особенно при улавливании субмикронных частиц с малым коэффициентом диффузии, соответствующих области максимума проскока, когда необходимо учитывать зацепление частиц. Этот вывод относится к высокопористым исходным фильтрам и высокопористым оболочкам. Более подробное рассмотрение осаждения в оболочке будет дано с учетом скольжения на вискерах и действия молекулярных сил притяжения. Решение этой задачи также важно для исследования кинетики забивки фильтров, т.к. растущий осадок частиц на волокне – высокопористые дендриты – можно аппроксимировать системой радиальных вискероов.

В заключение отметим, что в данном сообщении не ставилась задача расчета оптимальных параметров оболочки, соответствующих максимуму γ в зависимости от условий фильтрации. Здесь обозначены направления модификации волокон, ведущие к увеличению γ в задачах тонкого пылеулавливания в безынерционном режиме осаждения нано- и субмикронных частиц. Мы показали, когда и при каких условиях следует использовать волокна с пористыми поверхностными оболочками и какие факторы являются определяющими при выборе наилучших параметров оболочек. Очевидно, что предложенное направление модификации поверхности волокон в фильтрах может представлять интерес с точки зрения реализации каталитических процессов, особенно в режиме течения при числах Рейнольдса $Re > 1$, когда роль высокопористой проницаемой оболочки на волокне должна возрасти.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-03-00610).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kirsh A.A., Kirsh V.A.* // Коллоид. журн. 2019. в печати.
2. *Karwa A.N., Tatarchuk B.J.* // Sep. Purif. Technol. 2012. V. 87. P. 84.
3. *Park S.J., Lee D.G.* // Carbon. 2006. V. 44. P. 1930.
4. *Li H.W., Wu C.Y., Tepper F. et al.* // J. Aerosol. Sci. 2009. V. 40. P. 65.
5. *Kirsch A.A., Stechkina I.B.* Fundamentals of Aerosol Science. Ch. 4. Ed. by D.T. Shaw. N.Y.: Wiley-Interscience, 1978. P. 165.
6. *Stern S.C., Zeller H.W., Schekman A.I.* // J. Colloid Sci. 1960. V. 15. P. 546.
7. *Schedlovsky J.P., Paisley S.* // Tellus. 1966. V. 18. P. 499.
8. *Brewers J.M., Goren S.L.* // Aerosol Sci. Technol. 1984. V. 3. P. 411.
9. *Натансон Г.Л.* // Докл. АН СССР. 1957. Т. 112. С. 100.
10. *Стечкина И.Б.* // Докл. АН СССР. 1966. Т. 167. С. 1327.
11. *Miyagi T.* // J. Phys. Soc. Jpn. 1958. V. 13. P. 493.
12. *Kuwabara S.* // J. Phys. Soc. Jpn. 1959. V. 14. P. 527.
13. *Стечкина И.Б., Кириш А.А.* // Теор. основы хим. технологии. 1981. Т. 15. С. 79.
14. *Стечкина И.Б.* // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1979. № 6. С. 122.
15. *Кириш В.А.* // Коллоид. журн. 1996. Т. 58. С. 786.
16. *Кириш В.А.* // Коллоид. журн. 2006. Т. 68. С. 198.