

Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л. Я. Карпова

На правах рукописи

Припачкин Дмитрий Александрович

**ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АЭРОЗОЛЕЙ НА
ОСОБЕННОСТИ ИХ ОСАЖДЕНИЯ ИЗ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ НА
ПРЕПЯТСТВИЯХ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА**

Специальность 02.00.04 – Физическая химия

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва-2010

Работа выполнена в Научно-исследовательском физико-химическом институте им. Л. Я. Карпова

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Будыка А.К.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Алоян А.Е.

кандидат физико-математических наук
Мартынюк Ю.Н.

Ведущая организация: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Защита состоится «3» июня 2010 г. в 11 часов на заседании специализированного совета Д.217.024.02 при Научно-исследовательском физико-химическом институте им. Л.Я. Карпова по адресу:
105064, г. Москва, ул. Воронцово поле, д. 10

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Научно-исследовательского физико-химического института им. Л.Я. Карпова

Автореферат разослан « » _____ 2010 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д.217.024.02
Кандидат химических наук

Воронцов П.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Дисперсный состав аэрозолей является важнейшей физико-химической характеристикой, определяющей эволюцию аэродисперсных систем вследствие коагуляции, седиментации, переноса и др.

Среди методов, используемых для определения дисперсного состава, особое место занимают те, которые позволяют определять не только размеры аэрозольных частиц, но и другие их характеристики (например, химический или нуклидный состав, растворимость, плотность, массу и т.д.). К ним относятся методы, в которых разделение на размерные фракции происходит непосредственно в пробоотборном устройстве за счет осаждения частиц на отдельных каскадах (диффузионные батареи, импакторы и пакеты фильтров).

В случаях, когда размер аэрозольных частиц превышают 100 нм, а скорости потоков составляют величины порядка 1 м/с, использование диффузионных батарей для анализа дисперсного состава невозможно. Импакторы представляют собой селективные проотборные устройства, в которых разделение частиц на размерные фракции в диапазоне от долей до десятков мкм происходит за счет инерционного осаждения на препятствиях (коллекторах) при скоростях потоков до нескольких десятков м/с. Метод, основанный на инерционном осаждении аэрозольных частиц на волокнах фильтра при скоростях фильтрации от долей до нескольких м/с, известный как метод многослойных фильтров (ММФ) позволяет определить дисперсность аэрозолей в диапазоне размеров от 100 нм до нескольких мкм. Следовательно, для оперативного определения дисперсного состава аэрозолей наиболее подходящими являются каскадные импакторы и пакеты фильтров.

Импакторы состоят из каскадов, каждый из которых содержит разгонные сопла и коллекторы для осаждения аэрозольных частиц. Осаждение частиц с размерами менее 1 мкм требует значительного увеличения гидродинамического сопротивления этих устройств, что существенно затрудняет его использование. При этом снижается эффективность осаждения аэрозольных частиц и искажаются гидродинамические параметры несущей среды, что приводит к ошибкам в определении дисперсного состава, особенно в диапазоне от долей мкм до 1 мкм.

Пакет фильтров состоит из волокнистых материалов с разным гидродинамическим сопротивлением. Каждый из фильтров можно рассматривать как каскад, на котором осаждаются аэрозольные частицы определенного размерного диапазона. Частицы диаметром более 2 мкм осаждаются преимущественно на первом каскаде пакета, что приводит к большой неопределенности при оценке дисперсного состава методом многослойных фильтров для грубодисперсных аэрозолей (размер частиц более 1 мкм). Для снижения уровня неопределенности необходимо более равномерное распределение частиц по всем каскадам. Суммарное гидродинамическое сопротивление пакета фильтров в условиях высокоскоростной фильтрации существенно ниже, чем у каскадов импактора, используемых для анализа дисперсности частиц в диапазоне от долей до 1 мкм.

Таким образом, целесообразно соединить в одно устройство для определения дисперсного состава каскады импактора и пакет фильтров. При этом будет достигнута оптимальная эффективность осаждения частиц в диапазоне от 100 нм до десятков мкм при уменьшении суммарного гидродинамического сопротивления. В таком устройстве каскады импактора будут играть роль преосадителей

грубодисперсных аэрозолей. К тому же с увеличением количества каскадов повысится точность определения дисперсного состава аэрозолей. Для этого необходимо установить закономерности осаждения аэрозольных частиц на препятствиях в условиях высокоскоростной фильтрации. Иначе говоря, необходимо на основе теоретических и экспериментальных исследований инерционного осаждения аэрозольных частиц и методов вычислительной гидродинамики показать, что условия осаждения частиц в описанном выше каскадном устройстве позволяют использовать его для определения дисперсного состава в широком размерном диапазоне.

Цель работы. Установление закономерностей влияния физико-химических характеристик аэрозолей на особенности их осаждения из гидродинамических потоков на препятствиях при определении дисперсного состава на основе совместного использования каскадов импактора и пакета фильтров.

Для достижения этой цели решается ряд задач, среди которых:

1. исследование полей течений в модельных фильтрах в режиме высокоскоростной фильтрации. Оценка силы гидродинамического сопротивления волокон, коэффициента инерционного захвата и влияния неоднородности расположения волокон в ряду на перепад давления для переходных чисел Рейнольдса;
2. численное моделирование полей течения и осаждения аэрозольных частиц на волокнах модельных фильтров и инерционных каскадах, валидация численной модели устройства на основе экспериментальных данных;
3. разработка численной модели и конструкции устройства, выбор оптимального количества каскадов импактора и их сопряжение с пакетом фильтров;
4. экспериментальные исследования осаждения аэрозольных частиц произвольной физико-химической природы в волокнистых фильтрах в режиме высокоскоростной фильтрации;
5. разработка алгоритма для расчета характеристик логарифмически нормального распределения (ЛНР) аэрозолей по размерам на основе долей осажденного вещества на каскадах импактора и фильтрах пакета и экспериментальная проверка работоспособности многокаскадного устройства с использованием тестовых полидисперсных аэрозолей различного происхождения.

Научная новизна работы

1. Показано что, при числах Рейнольдса (Re) меньше 1 и при постоянстве параметра зацепления, число Стокса (St) однозначно характеризует коэффициент инерционного захвата частиц с различной плотностью, в то время как в области Re больше и равном 1 коэффициент захвата зависит как от St , так и от Re .
2. Теоретически и экспериментально исследовано влияние параметров структуры модельного волокнистого фильтра на перепад давления и коэффициент захвата. Установлено, что неоднородность расположения параллельных волокон в ряду ведет к росту отношения перепада давления к линейной скорости при меньших значениях Re и к более резкой зависимости коэффициента захвата от St , чем в упорядоченных системах волокон.
3. Теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что для расчета эффективности осаждения частиц на инерционных каскадах устройства, в том числе при скоростных режимах, близких к реальной

скорости дыхания человека и режимах течений при $Re > 1000$, может использоваться код вычислительной гидродинамики STAR-CD.

4. Разработана конструкция каскадного устройства для отбора аэрозолей. Экспериментально получена зависимость эффективности осаждения аэрозольных частиц на инерционных каскадах от скорости потока в разгонных соплах, плотности и размеров частиц.
5. Показано, что метод расчетно-экспериментальной калибровки с помощью кода вычислительной гидродинамики STAR-CD может использоваться при создании или модернизации конструкций средств для отбора аэрозолей различного назначения.

Практическая ценность работы.

1. Полученные в работе закономерности влияния физико-химических характеристик аэрозолей на особенности их осаждения на препятствиях позволяют рассчитывать и создавать трехмерные модели и конструкции средств отбора аэрозолей с оптимальными параметрами гидродинамических потоков для оценки дисперсного состава аэрозолей.
2. Разработанные на основе предложенных закономерностей устройства могут использоваться в химической и атомной отраслях промышленности для оценки распределений количества, массы и активности аэрозольных частиц по размерам.
3. Использование средств отбора аэрозолей в качестве измерителей характеристик дисперсного состава позволяет создать представительную систему контроля радиологической значимости аэрозоля, поступающего в организм человека при дыхании.
4. Полученные в процессе исследований результаты существенно снижают неопределенность при определении дисперсного состава искусственных промышленных радиоактивных аэрозолей в случае их ингаляционного поступления в организм человека. Снижение уровня неопределенности при использовании специальной модели для расчета индивидуальных доз облучения персонала повышает качество контроля радиационной обстановки.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод расчета коэффициента инерционного захвата на волокнах модельного фильтра в широком диапазоне чисел Стокса и параметров зацепления для чисел Рейнольдса более 1.
2. Модель каскадов импактора и конструкция устройства для отбора аэрозолей.
3. Экспериментально-расчетный метод калибровки инерционных каскадов устройства для определения дисперсности аэрозолей с помощью кода вычислительной гидродинамики и экспериментально полученных аэрозольных частиц селена.
4. Разработка и оптимизация алгоритмов оценки характеристик логнормального распределения аэрозольных частиц по размерам с помощью устройства для отбора аэрозолей на основе измеренных долей осажденного вещества на каскадах импактора и фильтрах пакета.

Апробация работы:

Основные результаты работы, доложены на следующих научных конференциях и семинарах: 10th World Filtration Congress, Leipzig, Germany, 14-18 April 2008; Всероссийская конференции по физической химии и нанотехнологиям "НИФХИ-

90", Москва, 10 – 14 ноября 2008 г. Научная сессия НИЯУ МИФИ-2010, Москва, 25-31 января 2010 г.

Публикации:

По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, в том числе 2 опубликованы в журналах из списка ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, утвержденных ВАК РФ, 3 патента, тезисы 4 докладов на российских и международных конференциях.

Структура и объем диссертации:

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем составляет 126 страниц печатного текста, в том числе 46 рисунков, 11 таблиц, 11 страниц списка литературы.

Содержание работы

Во **Ведении** сформулирована актуальность проблемы, цель работы и определены основные научно-технические задачи, решаемые в диссертации, обоснована научная новизна, практическая значимость работы.

В главе 1 приведен литературный обзор методов оценки дисперсного состава аэрозолей, исследований в области теории фильтрации инерционного осаждения аэрозольных частиц на волокнах фильтров и обзор работ в области вычислительной гидродинамики при моделировании импактора и фильтрующих сред.

Из литературного обзора методов оценки дисперсного состава аэрозолей, следует, что наибольшее распространение и практическую значимость в России и за рубежом получили методы, использующие каскадные или персональные импакторы и метод многослойных фильтров.

Из обзора работ в области теории фильтрации, следует, что теоретические исследования в области моделирования структуры волокнистых фильтров сводятся к выбору модели упорядоченной или неупорядоченной структуры, которая наиболее близка по гидродинамическим свойствам и осаждению аэрозольных частиц к волокнистому фильтру. В качестве такой модельной структуры может успешно использоваться веерная модель в области $Re < 1$ и соблюдении автомодельности течения. При этом вопрос о моделировании осаждения частиц в режимах $Re \geq 1$ (с нарушением автомодельности течения) остается открытым.

Основной вывод из рассмотренных работ по численному моделированию - в импакторах и моделях фильтров поля течений газовой среды, содержащей аэрозольные частицы, могут моделироваться с помощью расчетных CFD кодов. Как следствие, при помощи CFD кодов, можно оценить осаждение частиц на препятствиях в импакторе и волокнах фильтра при оптимальных параметрах гидродинамических потоков. Хотя в ряде случаев с нестандартной геометрией разгонных сопел и требуется дополнительное экспериментальное подтверждение результатов численного моделирования с помощью CFD кодов.

В главе 2 описаны теоретические основы методов моделирования каскадов импактора и создание моделей фильтров. Обоснованы расчетные схемы программного средства STAR-CD для проведения исследований по оценки гидродинамических характеристик потоков в импакторах и моделях фильтров.

После преобразования уравнения Эйлера уравнение движения несжимаемой вязкой жидкости примет вид:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \vec{u} \quad (1)$$

Уравнение (1) часто используется на практике при численном моделировании поля течения среды, которое можно назвать, хотя и с некоторой оговоркой, уравнением Навье-Стокса или системой уравнений движения вязкой несжимаемой среды.

Поле течения в наших исследованиях было смоделировано с использованием программного комплекса STAR-CD 3.2. Неявные методы решения алгебраических конечно-объемные уравнений, заложенные в CFD коде STAR-CD, на основе методов дискретизации, позволяют решать систему уравнений Навье-Стокса в декартовой системе координат. Предполагалось, что: поле течения стационарное, несжимаемое и ламинарное при нормальных условиях воздушной среды, т.е. температуре +20 °С и давлении 1 атм. Основные уравнения движения были дискретизированы методом конечных объемов (FV) и решались с помощью алгоритма SIMPLE (Patankar,1980). Уравнение, описывающие поле течения, в векторном виде можно записать как:

$$\rho(\vec{u} \cdot \vec{\nabla})\vec{u} = -\vec{\nabla}P + \mu\vec{\nabla}^2\vec{u} \quad (2)$$

где: \vec{u} - вектор скорости среды, м/с; P - давление в среде, Н/м²; ρ - плотность среды, кг/м³; μ - динамическая вязкость среды, кг/с*см.

Для описания турбулентного течения существует множество моделей. Нами была использована двухпараметрическая $k - \varepsilon$ модель турбулентности для больших чисел Re, относящаяся к классу линейных моделей, в которых для расчета компонент тензора рейнольдсовых напряжений используются линейные комбинации первых производных скорости потока по координатам. В пристеночной области для $k - \varepsilon$ модели полагают, что линейная скорость спадает по логарифмическому закону. Уравнения, описывающие поле течения, использованные в $k - \varepsilon$ модели, выглядят следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\rho u_i k - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] = \mu_t (P) - \rho \varepsilon - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\rho u_i \varepsilon - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (\mu_t (P) - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i}) - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + C_{\varepsilon 3} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t P_B + C_{\varepsilon 4} \rho \varepsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (4)$$

где: u_i – компоненты вектора скорости; μ_t – турбулентная вязкость; k – кинетическая энергия турбулентных пульсаций скорости; ε – скорость диссипации энергии; $P = S_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$; $P_B = 0$; $\sigma_k = 1$; $\sigma_\varepsilon = 1,22$; $C_{\varepsilon 1} = 1,44$; $C_{\varepsilon 2} = 1,92$; $C_{\varepsilon 4} = -0,33$; $k = 0,419$; S_{ij} - норма

тензора напряжений.

Для моделирования движения системы аэрозольных частиц в STAR-CD использовалась лагранжева модель. Уравнение движения частицы в векторном виде при лагранжевом подходе:

$$m_p \frac{d\vec{U}_p}{dt} = \vec{F}_a + \vec{F}_{all} \quad (5)$$

где: \vec{F}_a - аэродинамическая сила; \vec{F}_{all} - сумма всех остальных сил.

В исследовании был принято, что $\vec{F}_{all} = 0$, т.е. процессами седиментации, электростатики и действием перепада давлений можно пренебречь. Таким образом, уравнение (5) с учетом аэродинамической силы можно представить в виде:

$$m_p \frac{d\vec{U}_p}{dt} = \frac{1}{2} C_x \cdot \rho_p \cdot A_p |\vec{u} - \vec{U}_p| \cdot (\vec{u} - \vec{U}_p) \quad (6)$$

где: m_p – масса частицы; кг \vec{U}_p – вектор скорости частицы; м/с C_x – безразмерный коэффициент сопротивления $= \frac{24}{\text{Re}_p}$, $\text{Re}_p = \frac{\rho \cdot d_p \cdot |u - U_p|}{\mu}$

$C_c = 1 + \frac{\lambda}{d_p} \left[2.34 + 1.05 \exp(-0.39 \frac{d_p}{\lambda}) \right]$ – поправка Канненгема; d_p – аэродинамический диаметр частицы, мкм, λ – длина свободного пробега молекул в воздухе, мкм; ρ_p – плотность частицы, кг/м³; A_p – площадь поперечного сечения частицы $= \frac{\pi \cdot d_p^2}{4}$ (рассматриваются только сферические частицы), м².

Уравнение (6) используется для вычисления траекторий инерционных аэрозольных частиц конечного размера на основе рассчитанных полей течения с учетом влияния числа Рейнольдса. Расчет траекторий был выполнен на основе аппроксимационной схемы 3-го порядка QUICK. В схеме используется параболическая аппроксимация через две точки перед потоком и одну за потоком для получения интерполяционных значений.

В наших исследованиях были рассмотрены несколько типов геометрий модельных фильтров:

1. Двухмерная модель изолированных рядов параллельных эквидистантных цилиндров радиуса a с расстоянием между рядами $H \gg 2h$, $2h$ – расстояние между центрами цилиндров в ряду;
2. Двухмерная модель изолированных рядов параллельных эквидистантных пар цилиндров радиуса a с расстоянием между рядами $H \gg 2h$, $H \gg 2h1$, $2h$ – расстояние между центрами пар цилиндров в ряду, $2h1$ – расстояние между центрами цилиндров в паре;
3. Трехмерная модель из двух рядов параллельных эквидистантных цилиндров радиуса a , повернутых под прямым углом относительно друг друга с расстоянием между рядами $H \sim h$, $2h$ – расстояние между центрами цилиндров в ряду;
4. Двухмерная модель каскада импактора с круглыми разгонными соплами радиуса R и глубины T ($T/R > 1$), расположенными по окружности, и коллектором с центральным отверстием, отстоящим от разгонных сопел на расстоянии S ($S/R > 1$, $T/S \geq 1$).

Двухмерная модель изолированных рядов параллельных эквидистантных цилиндров представлена на рис 1. Наиболее исследованная модель в области $\text{Re} \ll 1$. Степень точности вычисления поля течения оценивали по величине безразмерной силы сопротивления на единицу длины волокна L в изолированном ряду.

Двухмерная модель изолированных рядов параллельных эквидистантных пар цилиндров представлена на рис 2. По аналогии с предыдущей моделью выделяем расчетную область в ряду.

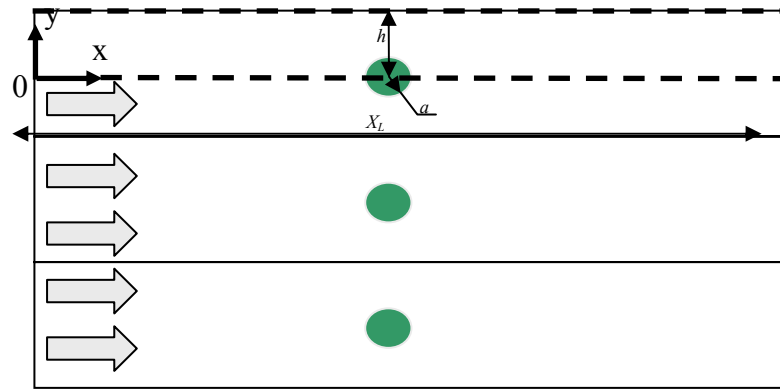


Рис. 1 Двухмерная модель изолированных рядов параллельных эквидистантных цилиндров

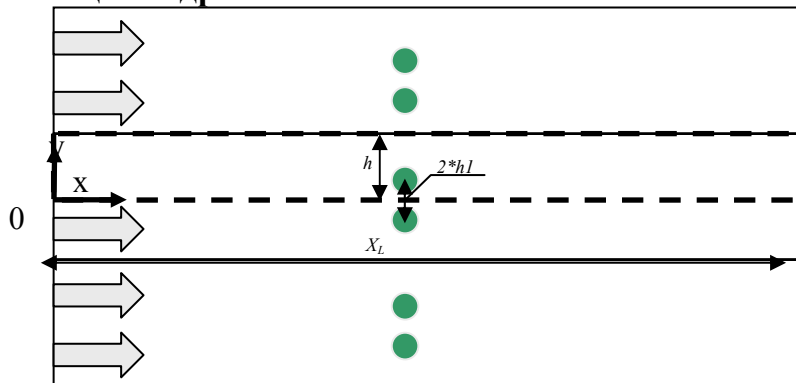


Рис. 2 Двухмерная модель изолированных рядов параллельных эквидистантных пар цилиндров

Для сравнения теоретических расчетов Марпла и Ридера с результатами моделирования поля течения с помощью CFD кода STAR-CD была рассмотрена трехмерная модель каскада импактора с круглым разгонным соплом и раскрытым на угол $\varphi=30^\circ$ входом в разгонное сопло (рис. 3). В наших исследованиях мы использовали следующие граничные условия:

- «inlet» - условие входа потока среды в расчетную область, с фиксированными компонентами линейной скорости $\{u_x, u_y, u_z\}$, $u_z \neq 0, u_x = 0, u_y = 0$;
- «outlet» - условие выхода потока среды из расчетной области $u_z = 0, u_x \neq 0, u_y \neq 0, p = 0$;
- «symmetry» - условие симметрии поля течения, при этом нормальные компоненты скорости и тензора вязких напряжений равны нулю;
- «wall» - условие «стенка с прилипанием», $\vec{u} = 0$ на коллекторной поверхности;

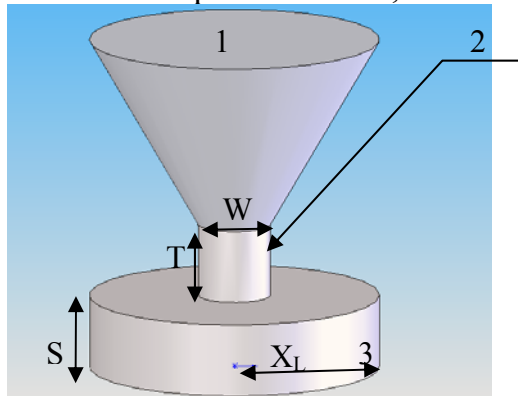


Рис. 3 Модели каскада импактора. Обозначения: W-диаметр сопла, T-длина сопла, S-расстояние от выхода из сопла до коллектора, X_L - расстояние от оси сопла до внешнего края коллектора. Граничные условия: 1-вход среды в расчетную область, 2-«стенка с прилипанием», 3-выход из расчетной области.

Для исследования полей течения и осаждения частиц была использована модель каскада персонального импактора с разгонным соплом с диаметром $W=1\text{мм}$ и параметрами $S/W=2$, $T/W=1$ (рис 4). Для всех многосопелных каскадов в нашей конструкции можно считать, что взаимным влиянием сопел друг на друга можно пренебречь.

Расчетная область каскада в персональном импакторе представляет собой осесимметричное сопло, расположенное на коллекторной пластине, которое переходит в дисковый кольцевой элемент. Вход в область осуществляется через сопло, а выход – через перпендикулярную плоскости входа в расчетную область грань, расположенную ближе к оси симметрии. С боковых сторон расчетная область обладает граничным условием симметрии потока. Боковая поверхность сопла, верхняя и нижняя части расчетной области, а также грань, смежная с разделительным кольцом, удовлетворяют граничному условию «стенка с прилипанием».

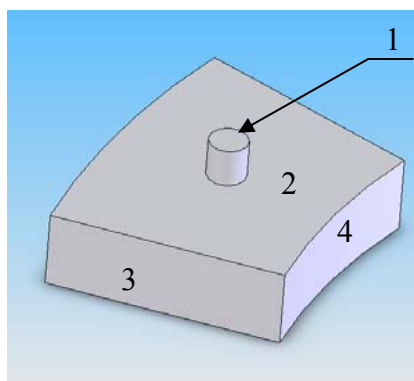


Рис. 4 Расчетная область и граничные условия: 1-вход в расчетную область, 2-«стенка с прилипанием», 3-симметрия потока, 4-выход из расчетной области.

В главе 3 представлены расчеты гидродинамических характеристик течений в модельных фильтрах и коэффициентов инерционного захвата аэрозольных частиц волокнами модельных фильтров с учетом влияния инерционности среды (числа Рейнольдса) на осаждение. Проведено моделирование гидродинамической среды на каскадах импактора и выполнена оценка эффективности инерционного осаждения частиц в широком диапазоне Re . Для режимов течений $Re < 1000$ выполнено сравнение с теоретическими расчетами Марпла и других, а для режимов течений $Re \geq 1000$ проведено сравнение с экспериментальными данными.

Вопрос о влиянии инерционности потока на сопротивление тонковолокнистого фильтра при увеличении скорости набегающего потока был исследован на примере двухмерных моделей фильтров. На рис. 5 представлены рассчитанная нами зависимость безразмерной силы сопротивления цилиндра в ряду от числа Рейнольдса (кривая 2) и экспериментальных данных (точки 4). Кривая 1 на рис. 6 построена по формуле, полученной с точностью до членов порядка Re^2 с помощью кода STAR-CD. Кривая 3 соответствует силе сопротивления волокна в ряду при $Re = 0$.

В области малых чисел Рейнольдса ($Re < 0,1-0,3$) результаты численного моделирования поля течения, полученные с помощью кода STAR-CD, находятся в хорошем согласии с результатами эксперимента и аналитическими формулами. Такое совпадение объясняется тем, что для ряда волокон с $a/h = 0.1419$ рост силы сопротивления начинается с $Re \sim 0,2-0,3$, а при меньших значениях числа Рейнольдса нарушение автомодельности течения либо вообще отсутствовало, либо было не значительным. С ростом скорости набегающего потока картина обтекания волокна в ряду меняется – происходит нарушение автомодельности течения,

усиливается эффект искривления линий тока вблизи волокна. При $Re > 1$ наблюдается незначительное расхождение результатов нашего численного моделирования и экспериментальных данных. Необходимо отметить, что для $Re > 1$ аналитическая формула (Кривая-1) также расходится с результатами эксперимента. Наиболее вероятная причина такого несовпадения заключается в том, что при численном моделировании мы принимаем, что несущая среда представляет собой несжимаемую жидкость, хотя экспериментальные данные получены для воздуха, который обладает несколько иными гидродинамическими характеристиками.

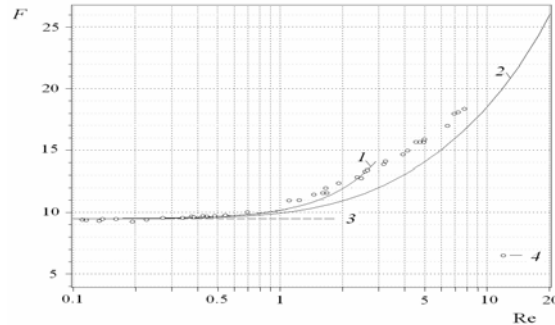


Рис. 5 Зависимости безразмерной силы сопротивления единицы длины волокна (диаметр $2a = 5$ мкм) F от Re в ряду с $a/h = 0.1419$ для поля течения Навье-Стокса. 1 – приближенная аналитическая формула, 2 – прямой численный расчет уравнений Навье-Стокса с помощью кода STAR-CD, 3 – сила сопротивления при $Re = 0$ (стоксово течение), 4 – эксперимент.

На рис. 6 показаны зависимости сил сопротивления волокон, находящихся в ряду, составленном из пар (шаг между волокнами в паре $2h_1$, шаг между парами волокон в ряду $2h$). Здесь приводится сравнение с экспериментальными данными (точки 3 и 4).

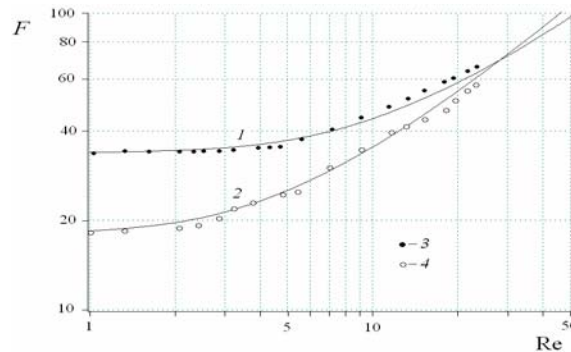


Рис. 6 Зависимости безразмерной силы сопротивления единицы длины волокна (диаметр $2a = 5$ мкм) F от Re в ряду с $a/h = 0.2066$, составленном из пар волокон: 1 – $a/h_1 = 0.4132$; 2 – $a/h_1 = 0.8196$; 3, 4 – данные экспериментов.

Хорошее согласие результатов численного моделирования, полученных с помощью кода STAR-CD, с данными эксперимента можно объяснить тем, что в эксперименте несущей средой выступал термостатированный глицерин, гидродинамические характеристики которого ближе к модели несжимаемой жидкости, чем воздух. Здесь необходимо также отметить, что если при нулевом числе Рейнольдса пара волокон обтекается как единое целое, то с ростом числа Рейнольдса доля потока, проходящая в малом зазоре между волокнами, увеличивается, достигая заметного значения.

Расчеты коэффициентов инерционного захвата были выполнены для модельного фильтра с теми же параметрами ($a/h = 0.1419$, $2a = 8.9$ мкм, $2h = 62.7$ мкм), для которых проводились эксперименты по измерению сил сопротивления (рис. 5) и осаждению частиц дибутылфталата с плотностью $\rho = 1.045$ г/см³.

Рассчитанные зависимости коэффициентов захвата частиц с плотностью $\rho = 1 \text{ г/см}^3$ для стокова поля течения и поля течения при $Re \sim 1$ даны на рис. 7 и рис. 8. Сплошные кривые 1 и 3 рассчитаны с учетом инерционности потока воздуха при нормальных условиях, пунктирные кривые рассчитаны для стокова поля течения. Для больших значений параметра зацепления $R = 0.2 - 0.4$ расхождение сплошных и пунктирных кривых в диапазоне $St = 0.7 - 10$ очень незначительное, поскольку числа Рейнольдса, соответствующие этим значениям St , не превышают единицы ($Re < 1$), причем с ростом параметра зацепления R или с ростом плотности частиц эти значения Re уменьшаются.

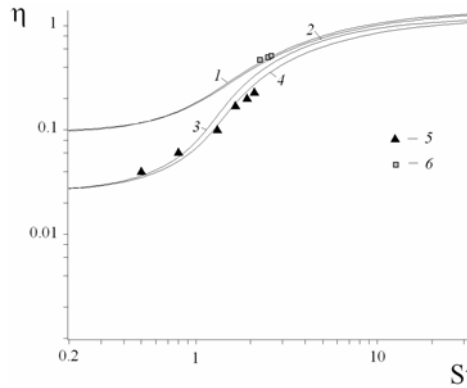


Рис. 7 Зависимости коэффициента захвата η от числа St : (1, 3) – с учетом Re , (2, 4) – стоково течение: $2a = 10 \text{ мкм}$, (1, 2) – $r_p = 2 \text{ мкм}$, (3, 4) – $r_p = 1 \text{ мкм}$, $a/h = 0.1419$, 5, 6 – эксперимент, 5 – $R = 0.206$, 6 – $R = 0.382$

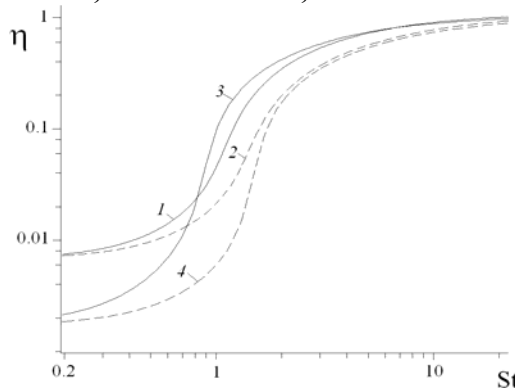


Рис. 8 Зависимости коэффициента захвата η от числа St : кривые (1, 3) – с учетом Re , (2, 4) – стоково течение, $2a = 10 \text{ мкм}$, (1, 2) – $r_p = 0.5 \text{ мкм}$, (3, 4) – $r_p = 0.25 \text{ мкм}$, $a/h = 0.1419$

Экспериментальные данные, полученные в стоковом режиме осаждения, имеют погрешность, соизмеримую с разницей коэффициентов захвата, оцененной по 1 и 3 кривой. Совершенно иная картина в случае более мелких частиц, т.е. малых R . Здесь различие сплошных и пунктирных кривых наблюдается при меньших значениях чисел Стокса, и в области $St \sim 1$ коэффициенты захвата отличаются более, чем на порядок, особенно в случае $R \sim 0.1$, когда $Re \approx 1$. Более того, мы видим, что сплошные кривые пересекаются, поскольку меньшим частицам при одинаковом числе St соответствует большая скорость (возрастает Re). Таким образом, видно, сколь существенно сказывается учет истинного поля течения при $Re \sim 1$ на величине η . В этом случае коэффициент захвата зависит не только от St и R , но и от числа Re , значение которого в каждой точке на кривой разное.

На рис. 9 показано влияние неоднородности расположения волокон в ряду на осаждение частиц ($R = 0.2$). Кривые 1 и 2 относятся к упорядоченной структуре, а

кривые 3 и 4 – к ряду, в котором четные волокна придвинуты к нечетным. Зазор между ними равен $0.2a$.

Как видно на рис. 9 неоднородность расположения волокон в ряду резко понижает эффективность улавливания частиц. Таким образом, величина коэффициента захвата зависит не только от a/h , от структуры, от параметров St и R , но и от числа Рейнольдса, причем, чем меньше R , тем больше сказывается Re (рис. 8). Кроме того, следует учитывать, что, чем меньше a/h , тем при меньшем Re перепад давления на фильтре становится нелинейной функцией скорости.

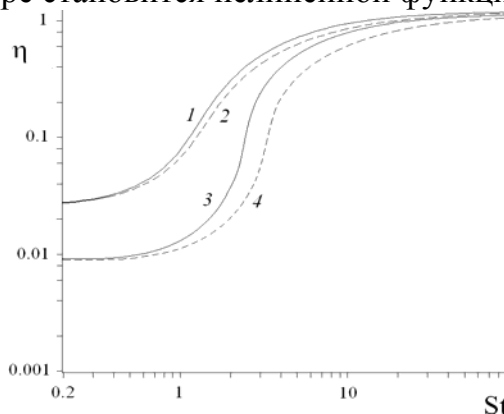


Рис. 9 Зависимости коэффициента захвата η от числа St для волокна в ряду с однородным (1, 2) и неоднородным (3, 4) расположением волокон: (1, 3) – с учетом Re , (2, 4) – стоксово течение: $a = 10$ мкм, $r_p = 2$ мкм ($R = 0.2$).

Для мониторинга аэрозолей, в том числе и радиоактивных, как правило, используют высокие скорости фильтрации. Как показывают результаты наших теоретических исследований в условиях высокоскоростной фильтрации при линейной скорости 1-2 м/с может нарушаться режим автомодельности течения, что будет приводить к неравнозначности эффективности осаждения аэрозольных частиц на каждом слое и условие перемешивания будет нарушаться. Кроме того, неоднородности в структуре реальных фильтров будут также влиять на режим течения, что будет искажать величину эффективности осаждения. В этом случае для оценки эффективности осаждения частиц на волокнах фильтра использовать веерную модель неправомерно.

Выходом из этой ситуации является экспериментальное исследование используемых в реальных условиях фильтров. В наших исследованиях была рассмотрена композиция пакета фильтров для дисперсного анализа аэрозолей, выпускаемых лабораторией аэрозолей НИФХИ им. Л.Я.Карпова. Композиция состоит из трех фильтров (АФА-3ДА-0,15(голубой фильтр, изготовленный из материала ФПА-70-0,15), АФА-3ДА-0,25(розовый фильтр, изготовленный из материала ФПА-70-0,25), АФА-РМА-20(белый фильтр, изготовленный из материала ФПА-15-2,0). В композиции фильтры располагают по ходу воздушного потока в порядке возрастания их стандартного аэродинамического сопротивления $[dp]$. Величины $[dp]$ для первого и второго фильтров, выраженные в миллиметрах водяного столба, служат исходными данными для определения параметров логарифмически нормального распределения (ЛНР). Пакеты фильтров были исследованы на автоматизированном стенде для испытания фильтрующих материалов фирмы TSI. Нами были исследованы режимы осаждения аэрозольных частиц NaCl при скоростях фильтрации от 0,3 до 1,7 м/с. Средний диаметр волокна взят из технических условий на материал.

Экспериментальные данные сравнивались с теоретическим расчетом для веерной модели фильтра для $Re < 0,4$. На рис.10 и 11 представлена эффективность

осаждения аэрозольных частиц на фильтрах из материалов ФПА-70-0,15, ФПА-70-0,25 и ФПА-15-2,0, соответственно, для скорости v равной 1 м/с плотность упаковки $\alpha \sim 0,035$. Результаты исследований фильтров показывают, что инерционный эффект при скорости фильтрации порядка 1 м/с слабо проявляется для частиц с аэродинамическим диаметром менее 0,5 мкм. Как видно на рис. 10 теоретический расчет с учетом инерционного эффекта показывает, что резкий рост эффективности осаждения происходит при d_a равном 0,3-0,4 мкм и St более 0,23, что согласуется с экспериментальными данными. Однако на точность оценки эффективности осаждения аэрозольных частиц в материалах ФПА-70-0,15 и ФПА-70-0,25, с помощью веерной модели, влияет полидисперсность и пространственная ориентация волокон. Особенно сильно эти эффекты начинают сказываться при усилении влияния инерционности среды на эффективность осаждения частиц на волокнах. Для материала ФПА-15-2,0 при скорости фильтрации 1 м/с также наблюдается слабое проявление инерционного эффекта (рис.11). Рост эффективности осаждения должен происходить при d_a равном 0,1-0,15 мкм и St равном 0,23. Однако, для частиц в диапазоне $0,1 < d_a < 0,5$ мкм в материале ФПА-15-2,0 при скорости фильтрации 1 м/с основным механизмом захват будет зацепление.

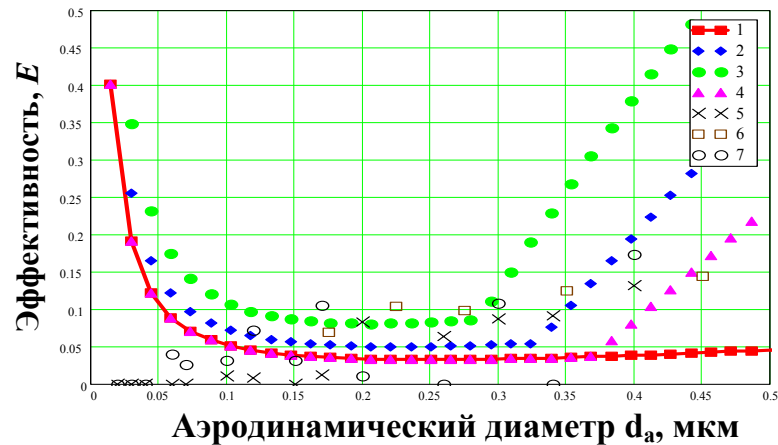


Рис. 10 Сравнение эффективности материала ФПА-70-0,15 с теоретическими расчетам по веерной модели при $v=1$ м/с ($Re=0,41$). 1–веерная модель без учета инерции ($d_f=6,06$ мкм); 2–4 веерная модель с учетом инерции ($d_f = 4, 5$ и $6,06$ мкм); 5–6 экспериментальные данные для ФПА-70-0,15 (TSI и Высокоскоростной стенд); 7- ФПА-70-0,17 (TSI).

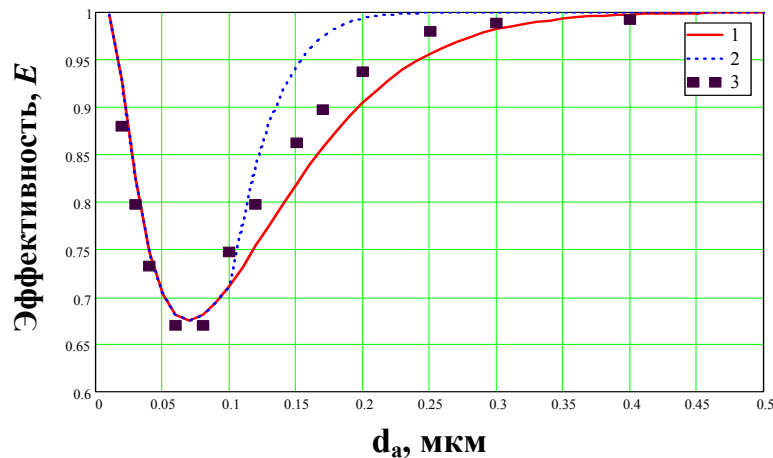


Рис. 11 Сравнение эффективности материала ФПА-15-2,0 с теоретическими расчетам по веерной модели при $v=1$ м/с ($Re=0,1$). 1–веерная модель без учета инерции; 2- веерная модель с учетом инерции; 3 – экспериментальные данные для ФПА-15-2,0 (TSI).

Экспериментально было показано, что аэрозольные частицы имеет ненулевую эффективность осаждения в материалах ФПА-70-0,15 и ФПА-70-0,25, поэтому независимо от того совпадают эти результаты с верной моделью или нет такие фильтры можно использовать в качестве каскадов для разделения аэрозольных частиц по размерам.

Кроме исследований осаждения аэрозольных частиц на волокнах было проведено исследование осаждения частиц на каскадах импактора. Эффективность осаждения частиц в импакторе зависит от числа Стокса St , определяющего вероятность инерционного осаждения аэрозольных частиц на препятствии. Если для оценки параметра $\sqrt{St_{50}}$ достаточно использовать результаты теоретических расчетов Марпла, Радера и Ли, то для оценки зависимости эффективности осаждения частиц от \sqrt{St} или от диаметра частицы d_p требуется проведение экспериментов. Форма кривой осаждения определяет избирательную способность каскада импактора по отношению к аэрозольным частицам.

На рис.12 и 13 представлены результаты расчета эффективности осаждения частиц E плотностью 1 и 4,8 г/см³ в зависимости от параметра \sqrt{St} для $Re=100$ и 1000, соответственно. Видно, что результаты моделирования, полученные с помощью STAR-CD, хорошо согласуются с расчетами Марпла для $Re=100$ и немного хуже – с расчетами для $Re=1000$. Некоторые исследователи отмечают, что с ростом Re степень согласованности результатов Радера и Марпла с расчетами по CFD кодам снижается. Действительно, Радер и Марпл в своих расчетах не учитывают, что течение несжимаемой жидкости в сопле уже при $Re > 1600$, может проявлять турбулентные свойства. Поэтому ламинарная модель течения в этой области чисел Рейнольдса становится неприменима.

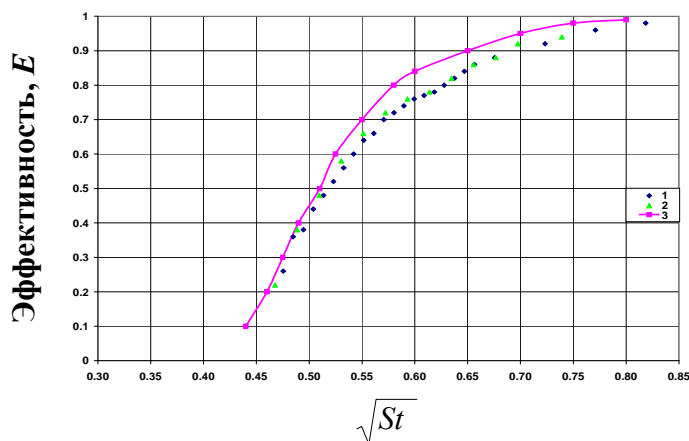


Рис. 12 Зависимость эффективности осаждения частиц от параметра \sqrt{St} для $Re=100$. Обозначения: 1 и 2 -частицы плотностью 1 и 4.8 г/см³, соответственно. 3-данные Марпла.

Полученные нами результаты, практически полностью совпадают с расчетами Радера и Марпла в области $Re \leq 1000$ и расходятся при $Re > 1000$. Кроме этого, результаты исследования показывают, что значения параметра $\sqrt{St_{50}}$, рассчитанные с помощью CFD кода STAR-CD, также совпадают с результатами Марпла для частиц различной плотности в широком диапазоне чисел Рейнольдса по потоку.

Для использования изложенного метода в реальных импакторах необходимо провести, особенно в области $Re > 1000$, сравнение результатов моделирования по

CFD коду STAR-CD с данными экспериментального исследования. Для этой цели в качестве объекта исследования была выбрана конструкция разработанного нами персонального импактора. Экспериментальные значения характеристик поля течения в разгонных соплах, приведены в таблице. На рис.14 представлено течение в разгонном сопле при $Re=1800$

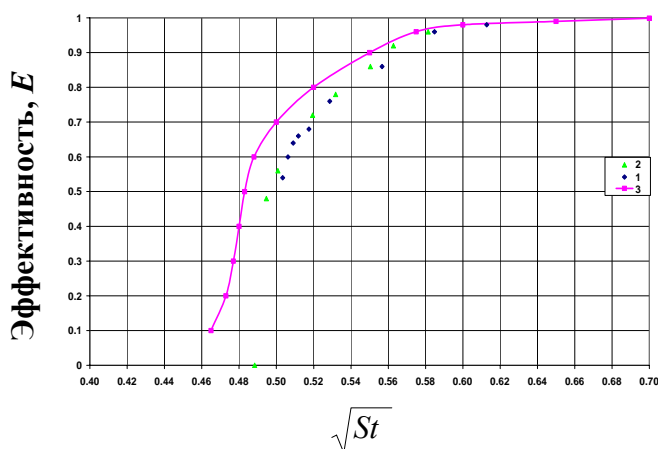


Рис. 13 Зависимость эффективности осаждения частиц от параметра \sqrt{St} для $Re=1000$. Обозначения: 1 и 2 -частицы плотностью 1 и 4.8 г/см^3 , соответственно. 3-данные Марпла.

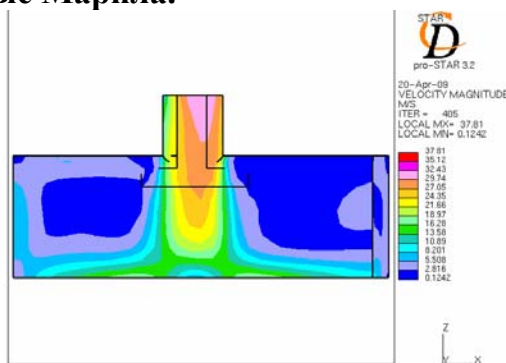


Рис. 14 Поле течения в разгонном сопле при $Re=1800$.

Таблица. Характеристики поля течения в эксперименте

№	Массовый расход через одно разгонное сопло, кг/с	Средняя линейная скорость в соплах м/с	Число Re в соплах
1	$4.9 \cdot 10^{-5}$	50 ± 2	3300
2	$3.5 \cdot 10^{-5}$	36 ± 1.4	2400
3	$2.6 \cdot 10^{-5}$	27 ± 1.1	1800

Для экспериментальной проверки результатов моделирования были использованы аэрозольные частицы селена с плотностью $\sim 4,5 \text{ г/см}^3$.

Основной характеристикой, определяющей эффективность импактора, является зависимость эффективности осаждения частиц E от параметра \sqrt{St} . В исследуемом персональном импакторе все разгонные сопла имеют одинаковый диаметр, поэтому в эксперименте достаточно оценить эффективность инерционного осаждения частиц от параметра \sqrt{St} для одного сопла, чтобы получить возможность оценить эффективность осаждения частиц на всех каскадах

независимо от скоростного режима в разгонном сопле, плотности и размеров частиц. Это также следует из результатов моделирования по STAR-CD и подтверждено экспериментальными данными, представленными на рис.15.

Таким образом, из сравнения результатов моделирования с экспериментом следует, что использование CFD кода STAR-CD для моделирования трехмерного течения на каскадах импактора позволяет рассчитать кривые эффективности осаждения аэрозольных частиц для скоростных режимов в разгонных соплах, соответствующих числам Рейнольдса от 1600 до 3500, а также учесть особенности конструкции при моделировании отдельных каскадов.

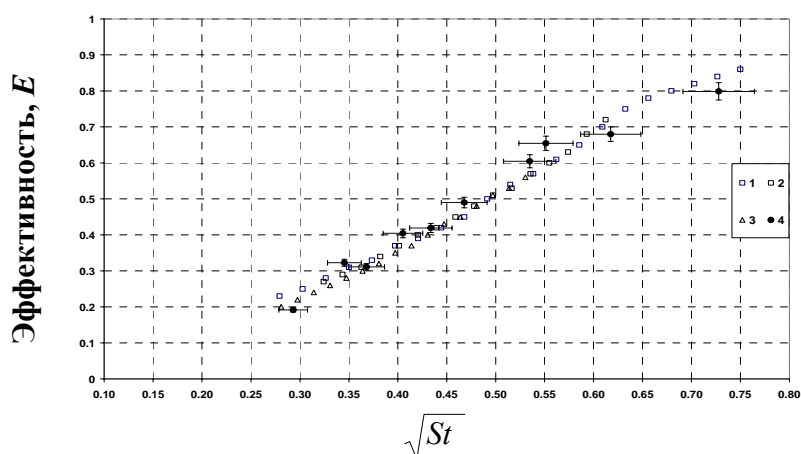


Рис. 15 Зависимость эффективности осаждения частиц от параметра \sqrt{St} в персональном импакторе для различных Re. 1-3300. 2-2400. 3-1800. 4 – экспериментальные данные

В главе 4 приведено описание реальной конструкции устройства для отбора аэрозолей, созданного на базе персонального импактора и пакета фильтров. Приведены результаты калибровки конструкции каскадного устройства на основе установленных закономерностей влияния физико-химических характеристик аэрозолей при их осаждении из гидродинамических потоков на препятствиях. Устройство для отбора аэрозолей выполнено на базе персонального импактора, который состоит из корпуса 1 и верхней крышки 2, которая присоединена к нему болтами 8. Внутри корпуса расположены коллекторные пластины 3, 4, 5, 6, отделенные друг от друга разделительными кольцами 7, а также фильтр или пакет фильтров 9. Для закрепления импактора на одежде предусмотрена фиксирующая пластина 11, соединенная с нижней частью корпуса при помощи винта 10 (рис. 16).

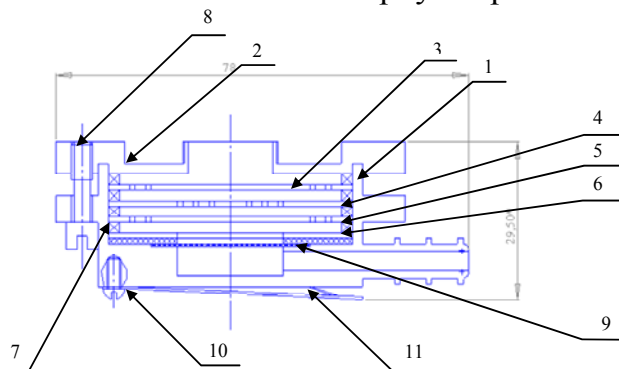


Рис. 16 Конструкция персонального импактора (чертеж)

Каскады импактора формируются корпусом 1, коллекторными пластинами 3,4,5,6 и разделительными кольцами 7. Первый каскад образован крышкой 2 и коллекторной пластиной 3. Воздушный поток, поступающий на первый каскад,

устремляется вниз к сопельным отверстиям на коллекторной пластине 3. Вторым каскадом образован коллекторными пластинами 4 (сверху) и 5 (снизу) и разделительным кольцом 7. Все последующие каскады повторяют конструкцию второго каскада. Коллекторные пластины имеют форму плоского диска, причем на коллекторной пластине 4 разгонные сопла расположены в центре, в то время как на остальных коллекторных пластинах – на периферии. Разделение частиц по размерам в импакторе происходит из-за последовательно возрастающей (от первого каскада к последнему) линейной скорости в разгонных соплах. В односопельных конструкциях это достигается за счет уменьшения диаметра отверстия, в то время как в данной конструкции – последовательного уменьшения количества отверстий равного диаметра. Габариты коллекторных пластин не превышают габаритов держателя стандартных радиометрических приборов, что позволяет использовать их непосредственно для проведения радиометрического анализа. Фильтр 9 размещен после коллекторных пластин.

Замена фильтра пакетом волокнистых фильтров модернизирует персональный импактор в устройство для определения дисперсного состава аэрозолей в широком диапазоне аэродинамических диаметров. Конструкция этого устройства обладает большим числом каскадов, чем у персонального импактора (каждый фильтр в пакете играет роль каскада) и позволяет добиться снижения аэродинамического сопротивления всей конструкции устройства по сравнению с персональным импактором. Это дает возможность использовать менее мощные и, следовательно, более легкие автономные воздухопрокачивающие устройства. Использование в конструкции устройства пакета волокнистых фильтров также позволяет снизить нижнюю границу измеряемых размеров частиц примерно до 0,1 мкм.

Как показывают теоретические и экспериментальные исследования, представленные в главе 3, калибровка каскадов импактора в составе устройства для отбора аэрозолей может быть проведена расчетным способом в широком диапазоне Re , а калибровка каскадов в виде фильтров опирается на результаты экспериментальных исследований на установке TSI. На рис. 17 представлены кривые эффективности осаждения частиц на каскадах устройства для отбора аэрозолей при объемной скорости отбора пробы 20 л/мин (на фильтрах 1,2 м/с).

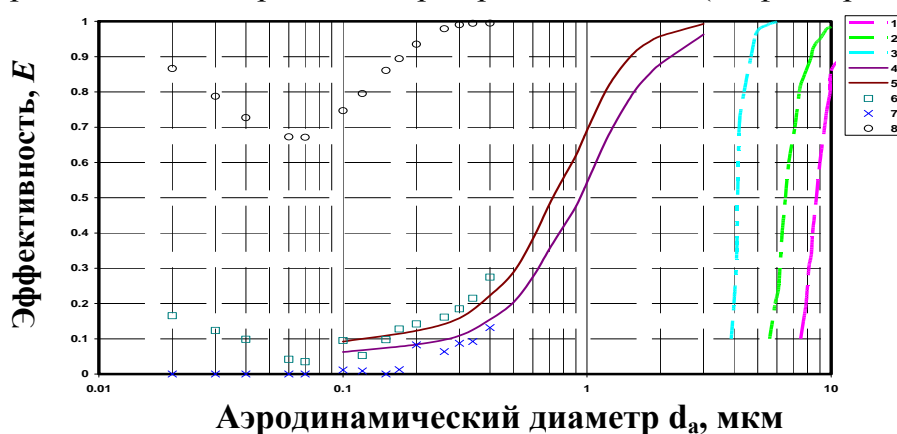


Рис. 17 Эффективность осаждения аэрозольных частиц в каскадном устройстве. 1,2,3 –каскады импактора (стальные подложки) ; 4,5 –фильтры из материала ФПА-70-0,15 и ФПА-70-0,25; 6,7,8 – эксперимент материалы ФПА-70-0,25, ФПА-70-0,15 и ФПА-15-2,0 (TSI 3160).

В главе 5 приведено описание практического использования разработанного на основе установленных закономерностей осаждения аэрозолей устройства (средства) для определения дисперсного состава аэрозолей. Приведены результаты

оценки дисперсного состава аэрозолей известных спектров. Определены условия использования каскадного устройства.

Для подтверждения работоспособности устройства (средства) для определения дисперсного состава аэрозолей. Нами были выполнены оценки дисперсного состава аэрозолей с унимодальным распределением. Все результаты получены для логарифмически нормальных распределений (ЛНР) наиболее точно описывающих исходные спектры. Расчеты выполнены с помощью специального программного средства, оценивались величины массового медианного аэродинамического диаметра (ММАД) и стандартного геометрического отклонения (СГО) исходных экспериментальных спектров. Расход воздуха прокачиваемого через устройство был одинаковым во всех экспериментах и составил 20 л/мин при линейной скорости на фильтрах 1,2 м/с. Исходное распределение частиц по аэродинамическим размерам определяли с помощью лазерного счетчика. В качестве примера оценки величины активностного медианного аэродинамического диаметра (АМАД) приведены результаты определения дисперсного состава радиоактивных аэрозолей $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ и ^{239}Pu . На рис. 18 представлена функция распределения массы аэрозольных частиц по размерам исходного спектра (установка TSI) и полученная на основе оценки параметров ЛНР. Оценки ММАД и СГО находятся в хорошем согласии с результатами расчетов характеристик исходного спектра на основе измерений лазерного счетчика.

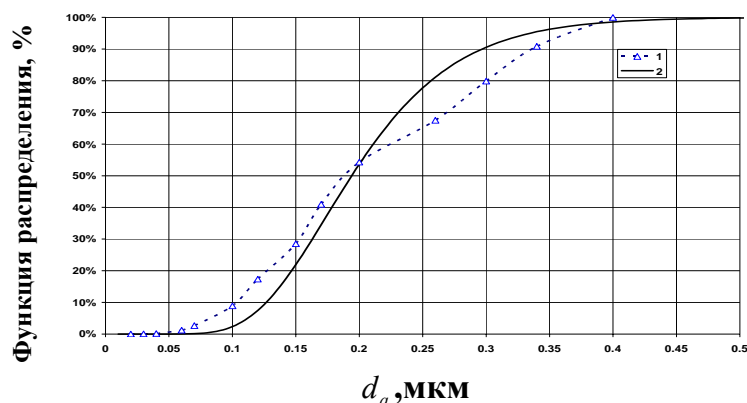


Рис. 18 Результаты расчетов характеристик ЛНР установка TSI. 1- Исходный спектр ММАД равен 0,18 мкм. 2- ЛНР с ММАД равным 0,19 мкм и СГО равным 1,4.

Кроме оценки ММАД и СГО на установке TSI нами были выполнены расчеты по оценке дисперсного состава аэрозолей NaCl на высокоскоростном стенде. На рис. 19 представлена функция распределения массы аэрозольных частиц по размерам исходного спектра (высокоскоростной стенд) и полученная на основе оценки параметров ЛНР.

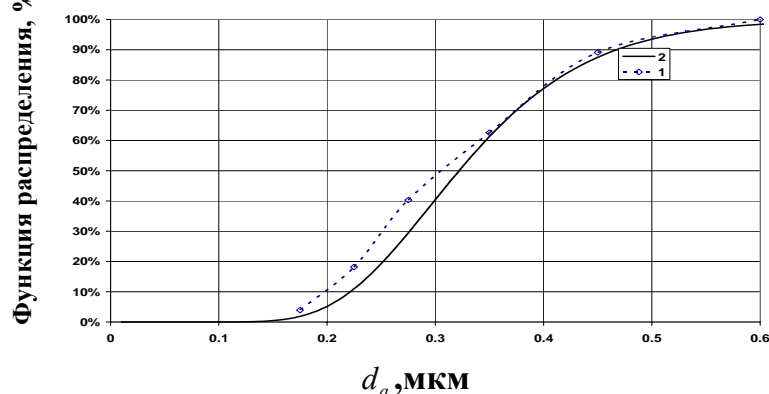


Рис. 19 Результаты расчетов характеристик ЛНР высокоскоростной стэнд. 1- Исходный спектр ММАД равен 0,3 мкм. 2- ЛНР с ММАД равным 0,32 мкм и СГО равным 1,38.

Необходимо отметить что, несмотря на полученные нами хорошие результаты оценки ММАД и СГО для аэрозолей NaCl, рассмотренный нами относительно унимодальный спектр полученный на установка TSI 3160 является скорее исключением, потому что изначально создает аэрозольные частицы полимодальных распределений. Для расширения возможностей устройства необходимо проверить его работоспособность на других спектрах аэрозольных частиц с отличающимися от NaCl характеристиками. В качестве таких аэрозолей нами были рассмотрены частицы аэрозолей селена.

Аэрозольные частицы селена были получены с помощью генератора описанного в главе 3. На рис. 20 представлена функция распределения массы аэрозольных частиц по размерам исходного спектра (генератор аэрозолей селена) и полученная на основе оценки параметров ЛНР. Оценки ММАД и СГО находятся в хорошем согласии с результатами расчетов характеристик исходного спектра на основе измерений лазерного счетчика.

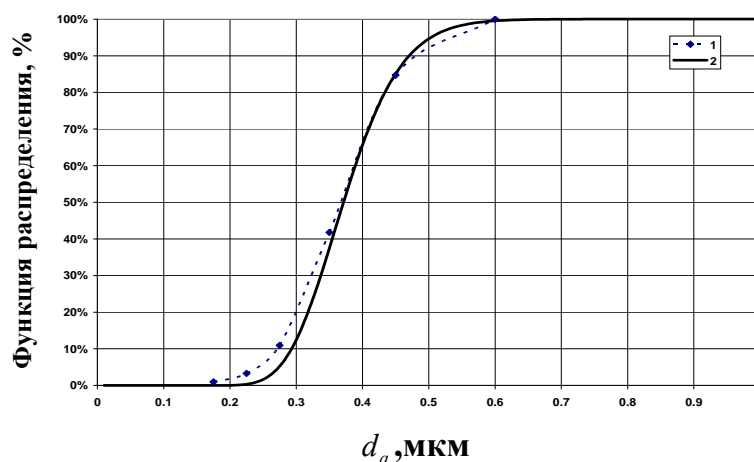


Рис. 20 Результаты расчетов характеристик ЛНР генератор аэрозолей селена. 1- Исходный спектр ММАД равен 0,36 мкм. 2- ЛНР с ММАД равным 0,37 мкм и СГО равным 1,29.

На рис. 21 представлены функции распределения активности аэрозолей ^{239}Pu и $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ по аэродинамическим диаметрам. Несмотря на то, что экспериментальные интегральные значения распределения в ряде случаев различаются с расчетными значениями функции распределения более чем на 10 %, ЛНР достаточно точно описывает исходное распределение активности по размерам. Значение величины АМАД для ^{239}Pu составило 0,9 мкм с СГО равным 2,5 и для $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ составило 0,2 мкм с СГО равным 7. В случае с $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ достоверность результатов оценки не велика так, как СГО полученного распределения больше 4. Это свидетельствует о том что, по всей видимости, форма распределения несколько отличается от ЛНР. Однако даже в этом случае, как показано на рис. 21, оценка АМАД достаточно хорошо отражает реальное распределение аэрозольных частиц $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$.

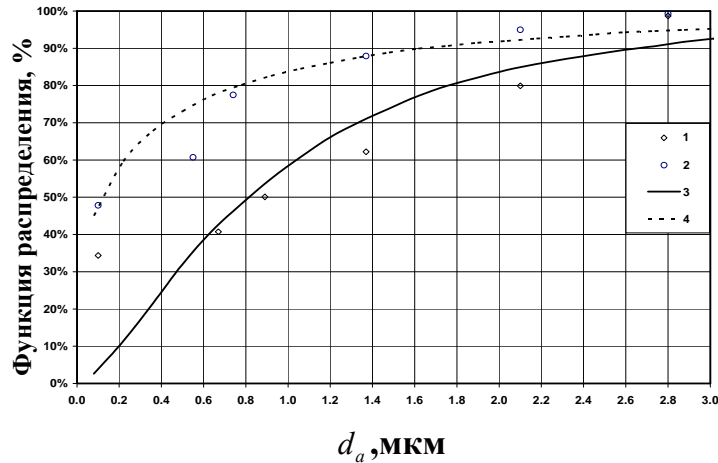


Рис. 21 Результаты расчетов характеристик ЛНР радиоактивные аэрозоли ^{239}Pu и $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$. 1- Измерения активности ^{239}Pu на каскадах устройства. 2- Измерения активности $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ на каскадах устройства. 3-Функции распределения для ^{239}Pu . 4-Функции распределения для $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$.

Таким образом, представленные результаты показывают работоспособность устройства для отбора аэрозолей, разработанного на основе установленных закономерностей влияния физико-химических характеристик аэрозолей на особенности их осаждения из гидродинамических потоков на препятствиях. Были выполнены расчеты по оценки ММАД и СГО для аэрозолей различной физико-химической природы полученных в отличных друг от друга условиях на разных типах экспериментальных установок. Кроме этого выполнены расчеты по оценке АМАД и СГО спектров радиоактивных аэрозолей ^{239}Pu и $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ с жидкой дисперсной фазой.

На практике разработанное каскадное устройство может быть использовано в атомной промышленности, в составе измерительного комплекса для оценки дисперсного состава радиоактивного аэрозоля, который должен использоваться для оценки АМАД:

- всегда, когда объемная активность превышает уровень $\text{ДОА}_{\text{ПЕРС}}$;
- когда основной вклад в эффективную дозу облучения персонала вносит внутреннее облучение;
- а также в аварийных режимах, когда уровень неопределенности дисперсного состава радиоактивного аэрозоля существенно влияет на ошибку при расчете эффективной дозы облучения персонала.

Основные выводы

1. На основе выявленных закономерностей влияния физико-химических характеристик аэрозолей на особенности их осаждения из гидродинамических потоков на каскадах импактора и фильтрах разработан и реализован расчетно-экспериментальный метод создания средства для отбора аэрозолей.
2. Выполнены расчеты гидродинамических и фильтрующих характеристик упорядоченных структур для моделирования реальных фильтров. Показано, что неоднородность расположения волокон в ряду ведет к росту отношения перепада давления к линейной скорости при меньших значениях чисел Рейнольдса и к более резкой зависимости коэффициента захвата от числа Стокса, чем в упорядоченных системах волокон. Установлено, что влияние инерционности среды (числа Рейнольдса) на коэффициент инерционного захвата усиливается с уменьшением параметра зацепления.

3. Экспериментально подтверждены теоретически установленные эффективности осаждения частиц на каскадах импактора для оптимальных параметров гидродинамических потоков, полученные с помощью кода вычислительной гидродинамики STAR-CD. Экспериментально подтверждены результаты моделирования, для скоростных режимов, близких к реальной скорости дыхания человека и течений при числах Рейнольдса больше 1000.
4. Разработана модель, конструкция и процедура калибровки устройства для отбора аэрозолей. Получены зависимости эффективности осаждения частиц от параметра \sqrt{St} , которые использовали для оценки эффективности каждого каскада импактора независимо от скоростного режима в разгонных соплах, плотности и размеров аэрозольных частиц.
5. Показано, что рассчитанные характеристики логарифмически нормального распределения дают хорошее приближение реальных спектров аэрозольных частиц. Получены функции массового распределения исследованных аэрозолей по аэродинамическим диаметрам.
6. Предложены условия использования разработанного на основе расчетно-экспериментального метода каскадного устройства для оценки дисперсного состава радиоактивных аэрозолей в атомной промышленности.

Основные результаты опубликованы в следующих работах:

1. Кирш В.А., Припачкин Д.А., Будыка А.К. Инерционное осаждение аэрозольных частиц из ламинарного потока в волокнистых фильтрах// Коллоидный журнал Т. 72, № 2, с.206-210.
2. Будыка А.К., Припачкин Д.А., Цовьянов А.Г. Моделирование и экспериментальное исследование осаждения аэрозольных частиц в персональном импакторе// АНРИ- 2009, № 3, с.27-37.
3. Budyka A.K., Pripachkin D.A., Tsovyanov A.G. Personal impactor to measurements aerosol inhalation dose //10th World Filtration Congress, Leipzig, Germany, 14-18 April 2008, Vol. III , p.456-462.
4. Припачкин Д.А. Моделирование полей течений вблизи волокон и оценка силы сопротивления при инерционном осаждении аэрозольных частиц на волокнах фильтра и в импакторах//Сборник тезисов «Всероссийская конференции по физической химии и нанотехнологиям "НИФХИ-90"», Москва, 10 – 14 ноября 2008 г.
5. Budyka A.K., Kirsch V.A., Pripachkin D.A. Inertial deposition of aerosol particles in fibrous filters at low and intermediate Reynolds numbers//FILTECH 2009, Wiesbaden, Germany, 13-15 October 2009.
6. Припачкин Д.А., Будыка А.К., Цовьянов А.Г. Расчетно–экспериментальный подход к созданию средств отбора аэрозолей для оценки дисперсного состава// Научная сессия НИЯУ МИФИ-2010. Аннотации докладов, Том. 1 , с.82.
7. Будыка А.К., Припачкин Д.А, Цовьянов А.Г. и др. //Патент на изобретение РФ RU 2290624 C1 24.06.2005.
8. Припачкин Д.А., Ризин А.И., Цовьянов А.Г. и др. //Патент на изобретение РФ RU 2239815 C1, 11.02.2003г.
9. Будыка А.К., Припачкин Д.А, Цовьянов А.Г. и др. //Патент на полезную модель RU 63535 U1, 30.06.2006г.