

УДК 532.517.2: 519.63

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСАЖДЕНИЯ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ ИЗ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА В КАНАЛАХ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИИ

**В. А. Бабенко, В. И. Байков, С. П. Германович, П. К. Зновец, Т. В. Сидорович**

*Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

**Введение.** Рост промышленного производства послужил причиной увеличения объемов выбросов в окружающую среду, а разработка большого количества новых технологических процессов способствует увеличению числа токсичных веществ, поступающих в атмосферу. Всё это часто приводит к ситуации, когда концентрация канцерогенных мелкодисперсных частиц или болезнетворных микроорганизмов в воздухе превышает предельно допустимые нормы для производственных помещений и становится опасной для человека [1–3].

Задачи мониторинга природных и антропогенных аэрозолей являются важнейшей составной частью слежения за состоянием окружающей среды. Различают прямые методы, основанные на непосредственном отборе проб аэрозоля, и косвенные оптические. При этом создание оптических приборов, с помощью которых можно будет различать находящиеся в воздухе организмы, относится скорее к области будущего [2].

В случае исследования прямыми методами необходимо выделить микроорганизмы, сохранив их жизнеспособность, поместить в питательную среду и по числу образовавшихся колоний определить их количество в единице объёма воздуха. На основании указанных данных санитарно – эпидемиологические службы оценивают степень опасности воздушной среды для жизнедеятельности человека [1]. Обеспечение адекватной интерпретации полученных результатов требует понимания основных физических процессов осаждения частиц из воздушного потока на вязкопластичную среду, что может быть достигнуто на основе современных методов математического моделирования.

Как правило, воздух поступает в кассету с питательной средой в течение установленного временного интервала при фиксированной скорости протекания через сито с большим количеством микроотверстий [1]. Вследствие инерции частицы не следуют строго по направлению воздушного потока, соударяются с поверхностью липкой питательной среды и фиксируются на ней. Количество и форма микроотверстий должны обеспечивать равномерное распределение частиц по поверхности среды, исключая наложение выросших после инкубирования колоний друг на друга. Кроме того, следует минимизировать унос частиц к всасывающему вентилятору.

Компьютерное моделирование позволяет решить две основные задачи: 1 – дать рекомендации по снижению погрешности прибора, обусловленной неизбежным уносом самых мелких частиц; 2 – обеспечить необходимое разрешение прибора, имея в виду применяемый дискретный принцип подсчета числа колоний [4]. Постановка этих задач может несколько отличаться. При решении задачи 1 следует рассматривать геометрию камеры в целом, а задачи 2 – исследовать истечение отдельной струи из единичного отверстия и взаимодействие её с преградой. Считается, что отдельные струи слабо взаимодействуют между собой. Данное предположение допустимо при достаточно малой глубине измерительной камеры, когда расширяющиеся струи не перекрываются.

Для достижения поставленных целей построена математическая модель, принимающая в расчет скольжение частиц (пыль, аэрозольные частицы) относительно турбулентного воздушного потока. С помощью этой модели исследовалось влияние на процесс осаждения частиц диаметра всасывающих отверстий, их количества, расстояния от

сопла до регистрационной пластины, скорости в струе, геометрии сопла и приемной кассеты при различных размерах частиц пыли. Наибольшее внимание уделялось частицам из оптимальной полосы ингаляции, которые могут легко осажаться в дыхательных путях (гидравлический диаметр  $d$  в интервале 1–15 мкм). Частицы большего размера задерживаются фильтрующей системой организма, меньшие частицы практически не задерживаются в легких. Кроме того, факторы окружающей среды существенно снижают жизнеспособность бактерий и вирусов на таких мелких частицах благодаря большому отношению площади поверхности к массе таких частиц.

**Моделирование движения аэрозольных частиц (пыли) в приемной камере.** Схема цилиндрической приемной кассеты изображена на рис. 1. Аэрозольные частицы втягиваются с потоком воздуха через заборную решетку и вследствие полученного импульса попадают на регистрационную пластину. При этом часть самых мелких частиц с выходящим потоком воздуха уносится к всасывающему насосу через кольцевую щель (на рисунке сверху), что вносит погрешность прибора. Возможны многие варианты геометрии приемной камеры.

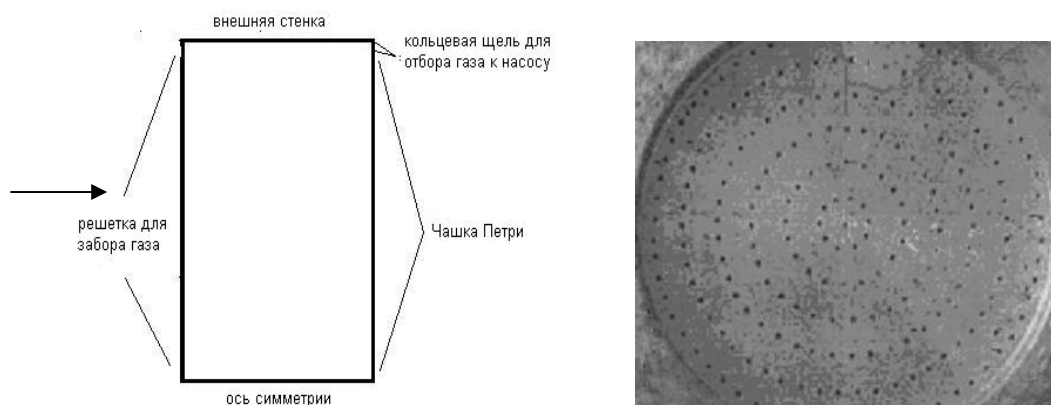


Рис. 1. Схема приемной кассеты и фотография типичного входного сита – вид по стрелке на рисунке слева

На рис. 2 показана типичная геометрия приемной кассеты, соответствующая 219–дырочному импактору, входное сито которого изображено на рис. 1б. В данном варианте выход воздуха к всасывающему насосу затруднен, воздух покидает приемную кассету через кольцевой канал малого сечения. При построении математической модели учитывались развитие профиля скорости и отставание дискретных частиц от сплошной среды в сопле (слева на обоих рисунках находится расчетная область конического сопла). В ходе численного моделирования течения в приемной кассете в целом (задача 1) вместо набора отдельных отверстий рассматривались эквивалентные кольцевые щели с тем же сечением. Так, для сита 219–дырочного импактора эквивалентный размер каждой из семи кольцевых щелей оказался равен 0.2 мм. При расчете массовый расход воздуха во входном сечении изменялся в пределах  $5 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-2}$  кг/с, профиль скорости на входе принимался равномерным, при этом значения скорости лежали в диапазоне 2–10 м/с. Переход к эквивалентным кольцевым щелям дает возможность ограничиться двумерной постановкой задачи и не рассматривать реальную трехмерную геометрию с очень большим количеством струй и числом расчетных элементов. Основным вычисляемым параметром в такой постановке является процент захваченных приемной кассетой частиц в зависимости от их размера. Считается, что удар аэрозольных (пылевой) частиц о регистрационную пластину, представляющую собой вязкопластичную среду,

полностью неупругий. Данный подход дает возможность рассчитать поле скоростей и прочих гидродинамических величин в приемной кассете в целом.

В иной постановке (задача 2) рассчитывается отдельная струя из одиночного отверстия. Данная постановка позволяет учесть воздействие на такую струю сносящего поперечного потока, найденного на основании решения задачи 1, и определить гистограммы и дисперсии частиц, попадающих на пластину. Области регистрации струй из отдельных отверстий должны быть хорошо сфокусированы, не перекрывая друг друга.

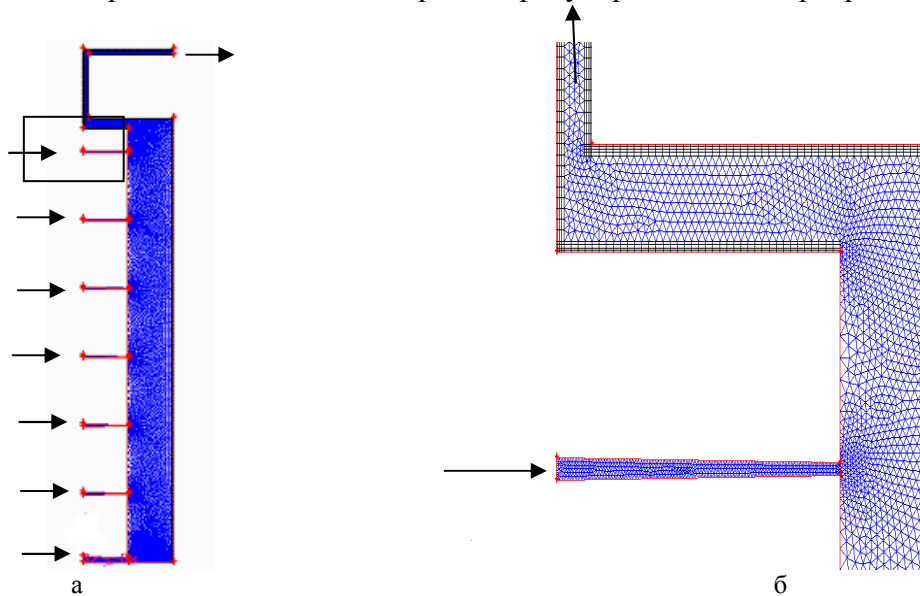


Рис. 2. Расчетная область с наложенной конечно–элементной сеткой (а) и область верхней кольцевой щели, выделенной прямоугольником слева (б). Стрелки показывают направление течения воздуха

Математическая модель состоит из блоков решения уравнений механики сплошной среды и механики движения частичек пыли, на которых могут прикрепляться микробиологические организмы. Здесь эта модель подробно не описывается. Используется монодисперсное приближение. Моделирование движения частиц производится в лагранжевой системе отсчета. Ввиду их невысокой объемной концентрации обратное влияние дискретных фазовых траекторий на поток однородной фазы не учитывается. Дисперсия частиц вследствие влияния турбулентности в однородной фазе описывается с помощью стохастической модели облака частиц. В модели облака частиц отслеживается статистическая эволюция облака материальных точек относительно средней траектории. Концентрация материальных точек в пределах облака выражается гауссовой функцией плотности распределения вероятности (ПРВ). На входе в сопло считается, что скорость аэрозольных частиц совпадает со скоростью воздуха, на выходе из сопла в приемную кассету эти скорости различаются.

**Результаты моделирования.** Траектории и процент осажденных на поверхность аэрозольных частиц зависят от многих факторов: массы частиц (размера), расстояния от сопла до поверхности с вязкопластичными свойствами, условий выхода воздуха к насосу из измерительной камеры, формы сопла, скорости воздуха, наличия или отсутствия турбулентных флуктуаций, от свойств поверхности. Исследовались численно порядка двадцати различных геометрий, и для каждой из них варьировался размер частицы и расход воздуха. Изложим выводы, следующие из этих расчетов.

Основным параметром, влияющим на работу входной камеры прибора, наряду с линейной скоростью на выходе из сопла, является расстояние до поверхности осажде-

ния  $h$ . Точную фокусировку струй обеспечить крайне сложно для величины  $h$  более 6 мм. Так в расчетах при  $h = 1.5$  см свыше 60% частиц размером 10 мкм уходили к всасывающему насосу из входной камеры, не попадая на измерительный элемент, 80% частиц размером 2 мкм минуют плоскость осаждения. Из анализа результатов выполненных расчетов следует, что гидравлическое сопротивление на выходе из камеры должно быть значительно больше гидравлического сопротивления самой камеры, значение глубины входной камеры должно лежать в диапазоне 3–5 мм, а значение проницаемости всасывающей крышки прибора на просвет — находиться на уровне 2–5%. При этом линейная скорость воздуха в отверстии сита изменяется в пределах от 5 до 10 м/с. Для её повышения следует выполнять конусные отверстия с сужением, направленным внутрь входной камеры (рис. 2). Максимальная скорость в выходном сечении такой струи 50 м/с. Струи ударяются о преграду со скоростью порядка 2 м/с, что также является удовлетворительным, поскольку из литературы известно, что слишком большая скорость струи может вызвать негативное воздействие на целостность вязкой пластичной среды ввиду ее высушивания. Струи, ударяясь, растекаются почти параллельно преграде в направлении от центра к периферии. В этот момент благодаря турбулентным флуктуациям частиц в потоке происходит интенсивное их осаждение на регистрационную поверхность.

Турбулентный характер переноса является положительным фактором, способствующим более полному захвату частиц из потока воздуха. Интенсивность турбулентности в данном течении составляет несколько сотен процентов. Обычно в гидродинамических течениях процент турбулентности редко превышает 50%. Объяснением столь большого уровня турбулентности в данном течении является то, что это классическое течение за решеткой, в котором струи распадаются, а кинетическая энергия основного потока трансформируется в кинетическую энергию турбулентности. При большом уровне турбулентности в микроструях будет весьма интенсивным поперечное по отношению к струе «блуждание» частиц. Такое движение способствует эффективному осаждению частиц на вязкой среде измерительного элемента. Расчеты, проводимые без учета турбулентности, дают почти в два раза меньший процент захваченных мелких частиц размером 2 мкм и ниже. Напротив, учет или неучет турбулентности почти не влияет на процент захвата крупных частиц.

В расчетах для ряда геометрий приемной кассеты достигнут достаточный для точной работы прибора процент захвата мелких частиц (более 2/3 частиц размером 2 мкм). На рис. 3 для геометрии, изображенной на рис. 2, построена зависимость процента захваченных частиц от диаметра частиц при различных расходах.

Поставим теперь вопрос, ценой каких гидравлических затрат достигается удовлетворительная работа прибора. Требуемый перепад давления, определяемый по формуле  $N = \Delta P G / \rho$ , где  $G$  – массовый расход, а  $\rho$  – плотность воздуха, и механическая мощность на прокачку в зависимости от расхода изображены на рис. 4. Очевидно, что данные параметры остаются в разумных пределах, обеспечивая возможность создания достаточно легкого переносного варианта прибора. При этом достигается хорошая фокусировка аэрозольных (пылевых) частиц, попадающих на измерительный элемент, позволяющая воплотить дискретный принцип измерения. Для питания прибора при данных массовых расходах достаточно небольшого аккумулятора. При увеличении расхода в силу квадратичного роста перепада давления и мощности по закону куба от расхода механическая мощность быстро нарастает. Поэтому целесообразно ограничиться интервалом массовых расходов менее  $G = 5 \cdot 10^{-3}$  кг/с.

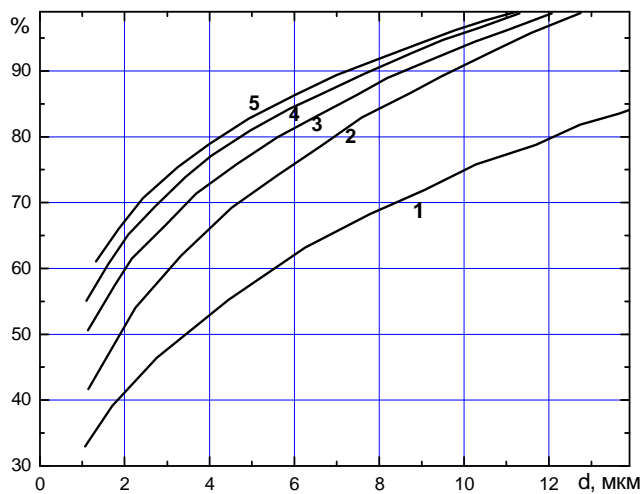


Рис. 3. Процент осажденных на вязкопластичную среду частиц как функция их диаметра при различных расходах. 1 –  $G=0.0005$  кг/с, 2 –  $0.001$  кг/с, 3 –  $0.002$  кг/с, 4 –  $0.003$  кг/с, 5 –  $0.004$  кг/с

Проведенные исследования позволяют выбрать оптимальную геометрию устройства, расход воздуха, форму сопла и другие конструктивные характеристики. В большинстве технологий детектирования биологических агентов подсчитывается число колоний микроорганизмов. В соответствии с дискретным принципом измерения на поверхности регистрационной пластины «пятна» от струй, исходящих из различных отверстий во входной крышке прибора, не должны перекрываться, т.е. речь идет о разрешении отдельных струй на измерительном элементе.

Было выполнено систематическое исследование разрешения прибора. Задача решалась с помощью построения гистограмм распределения частиц на измерительном элементе для различных расходов, формы отверстий и диаметра частиц с тем, чтобы добиться требуемой степени фокусировки частиц. Изучалось влияние конусности отверстия и расстояния до поверхности вязкой среды на фокусировку потока частиц.

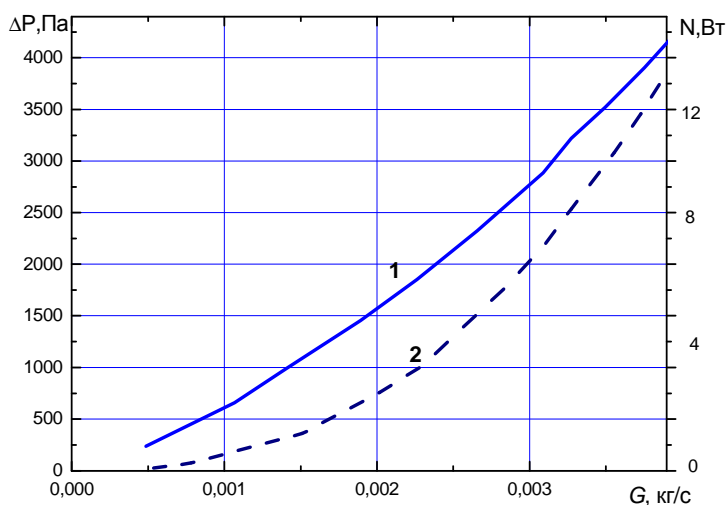


Рис. 4. Зависимости: 1 – перепада давления между входным сечением сопла и выходным сечением кольцевой щели, ведущей к насосу (см. рис.1) (левая ось); 2 – требуемой механической мощности для прокачки (правая ось) от расхода воздуха

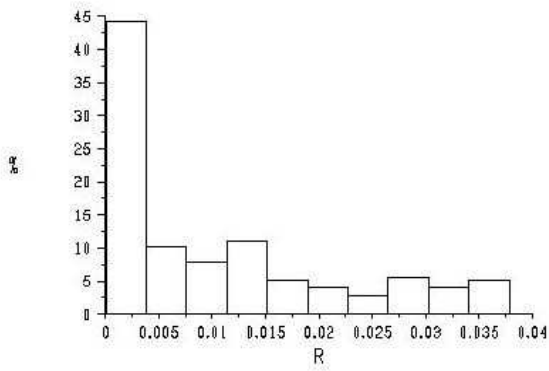
Основное назначение конусности заключается в том, чтобы ускорить частицы, вылетающие из сопла. Существует и определенное фокусирующее действие коническо-

го сопла, поскольку линии тока на некотором расстоянии от сопла становятся сходящимися. Коническое сопло, подобно собирающей оптической линзе, сводит «параллельные лучи». На некотором расстоянии за соплом сечение сходящейся струи начинает снова нарастать. Законы расширения струй являются достаточно сложными и зависят от скорости струи. От скорости струи и размера (массы) частиц зависит также траектория частицы в силовом поле ее взаимодействия с потоком непрерывной фазы. Кроме этого, может также существовать зависимость в фокусирующих свойствах сопла от толщины крышки, т.е. длины сопла. Сопло малой длины просто не успевает повлиять заметно на траектории частиц. Для исследования всех этих факторов строились гистограммы распределения мест падения частиц на измерительный элемент при различных параметрах.

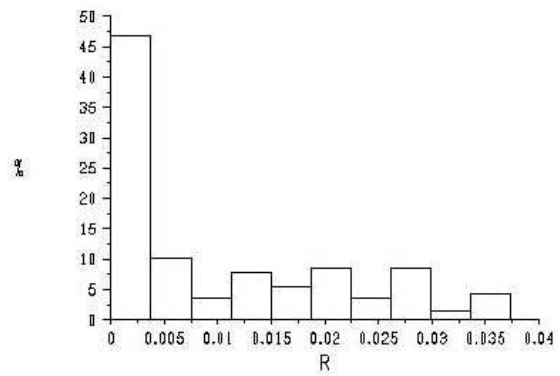
Построение гистограмм осуществлялось следующим образом. Вначале для каждого варианта производился расчет полей скорости непрерывной фазы - воздуха. Затем производился впрыск некоторого представительного числа частиц во входное сечение сопла и рассчитывалась их траектория с учетом взаимодействия с непрерывной фазой. В начальном сечении сопла (на рис. 2 слева) задавалось равенство по направлению и по величине скоростей газа и частиц. В сопле, вследствие имеющейся конусности, газ ускоряется и меняет направление. Считается, что все частицы, соударяющиеся с поверхностью регистрационной пластины, захватываются. Рассчитывался процент частиц, падающих на ту или иную часть измерительного элемента.

Для построения гистограмм исследовалась как камера в целом (задача 1, поставленная во введении), так и одиночная струя из одного отверстия (задача 2). При решении задачи 2 использовалось допущение, что отдельные струи пренебрежимо слабо взаимодействуют между собой. Данное предположение допустимо при достаточно малой глубине измерительной камеры, когда расширяющиеся струи не перекрываются. Математически отсутствие взаимодействия между отдельными струями выражается в постановке граничного условия симметрии на поверхности расчетной области, расположенной на середине расстояния между отдельными отверстиями в крышке на рис. 2. Задача решается для двумерной геометрии в цилиндрической системе координат. Расчетная область для одной струи представляет собой цилиндр, в центре которого расположено данное отверстие. Радиус цилиндра равен половине расстояния между отверстиями.

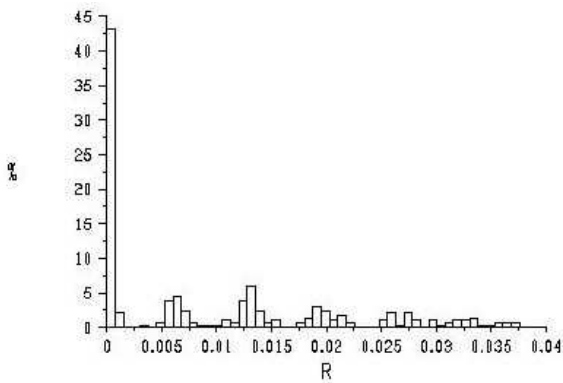
Гистограмма мест регистрации осажденных на поверхность частиц, построенная по результатам решения задачи 1, представлена на рис. 5. Видно, что для частиц диаметром 10 и 15 микрон разрешение отдельных струй достигается очень хорошо, что позволяет воплотить дискретный принцип измерения. Для частиц размером около микрона наблюдается размазанная картина, хотя пики и различимы. Начиная с 5 мкм, пики на гистограмме становятся четкими, за исключением двух последних периферийных. Худшее разрешение на периферии объясняется влиянием отбора воздуха к всасывающему вентилятору через кольцевую щель (рис. 2). Интенсивность центрального пика (рис. 5) заметно выше остальных. Связано данное явление с тем, что струи из остальных отверстий импактора, кроме центрального, заменяются эквивалентной коаксиальной плоской струей, а законы разрушения плоских струй отличаются от законов разрушения круглых струй. В остальном гистограммы на рис. 5 демонстрируют достаточно простое поведение – с увеличением размеров частиц степень их фокусировки возрастает.



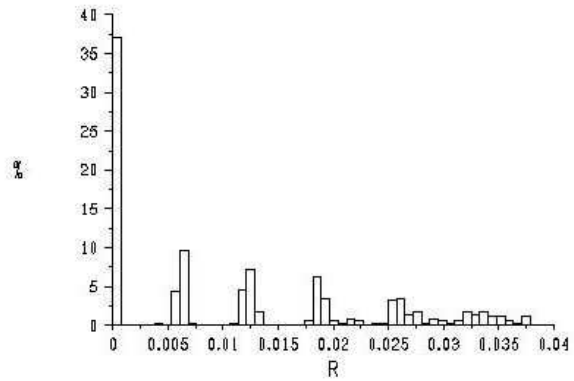
а



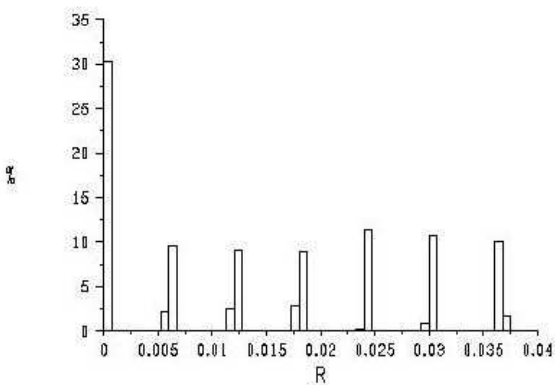
б



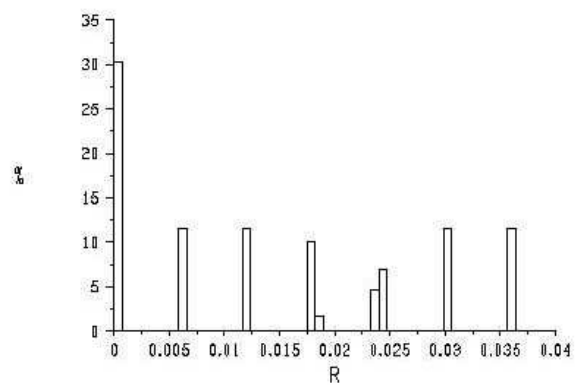
в



г



д



е

Рис. 5. Гистограмма мест падения частиц в процентах на регистрационную пластину в зависимости от радиальной координаты для расхода  $G = 0.002$  кг/с (геометрия рис. 2): а - при  $d = 1$  мкм, б - 2, в - 3, г - 5, д - 10, е - 15.

Вместе с тем данный вопрос требует дальнейшего планомерного исследования для разных размеров частиц и для струй, истекающих из отверстий различной геометрии. Приведем для сравнения аналогичные гистограммы при половинном (рис. 6) и удвоенном (рис. 7) по сравнению с результатами, приведенными на рис. 5, расходом.

Большая интенсивность центрального пика на рис. 5-7 является следствием более медленного распада круглой в сечении центральной струи по сравнению с «эквивалентными» кольцевыми струями, для которых отношение площади поверхности к площади сечения больше.

Постановка задачи 2 исправляет данную некорректность постановки задачи и дает более подробную картину распределения частиц от одной струи на измерительном элементе. При решении этой задачи получено, что максимум распределения при всех расходах, кроме самого большого из рассматриваемых, приходится не на центр проекции сопла.

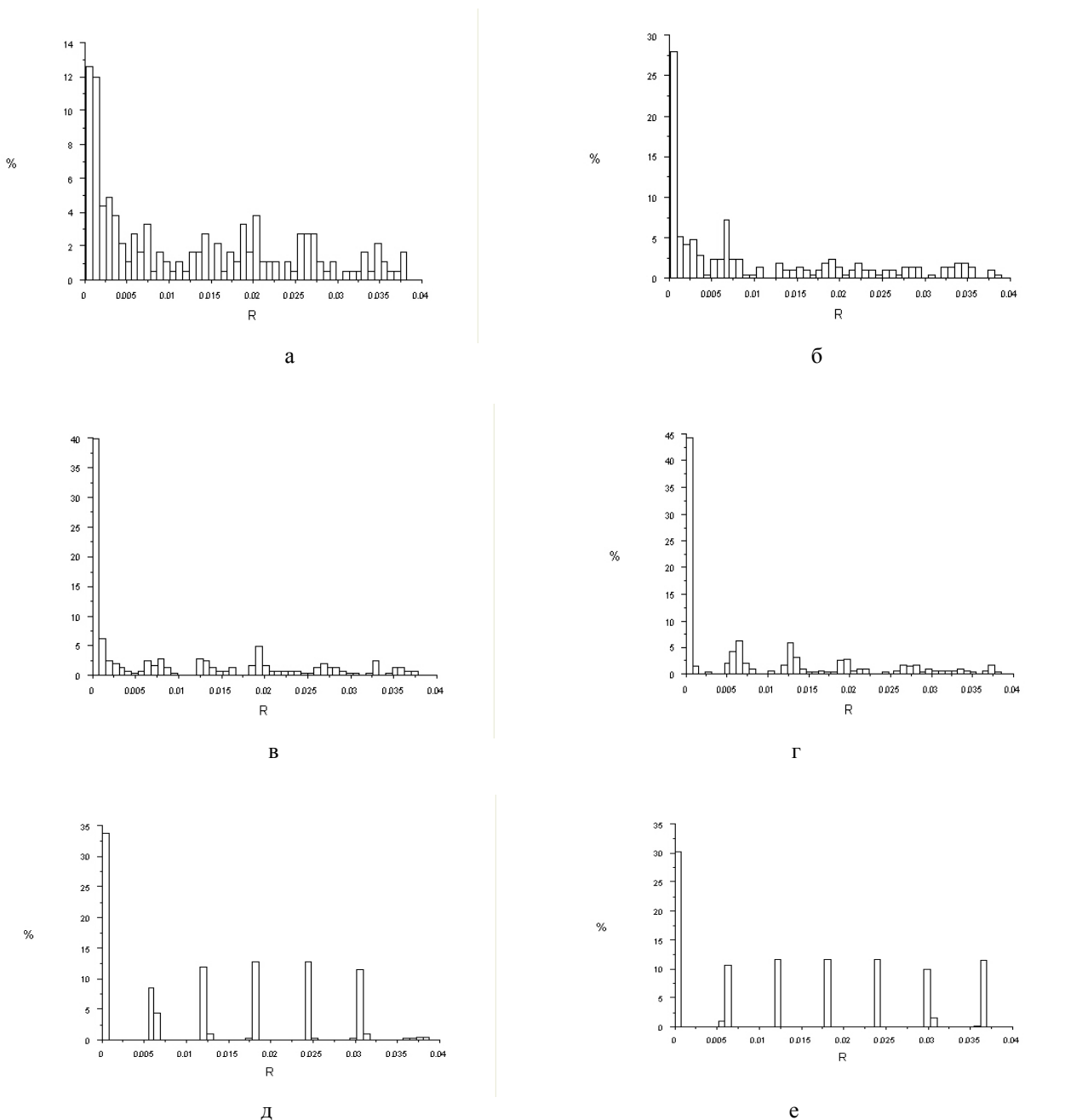


Рис. 6. Гистограмма мест падения частиц в процентах на регистрационную пластину в зависимости от радиальной координаты для расхода  $G = 0.001$  кг/с (геометрия рис. 2): а - при  $d = 1$  мкм, б - 2, в - 3, г - 5, д - 10, е - 15



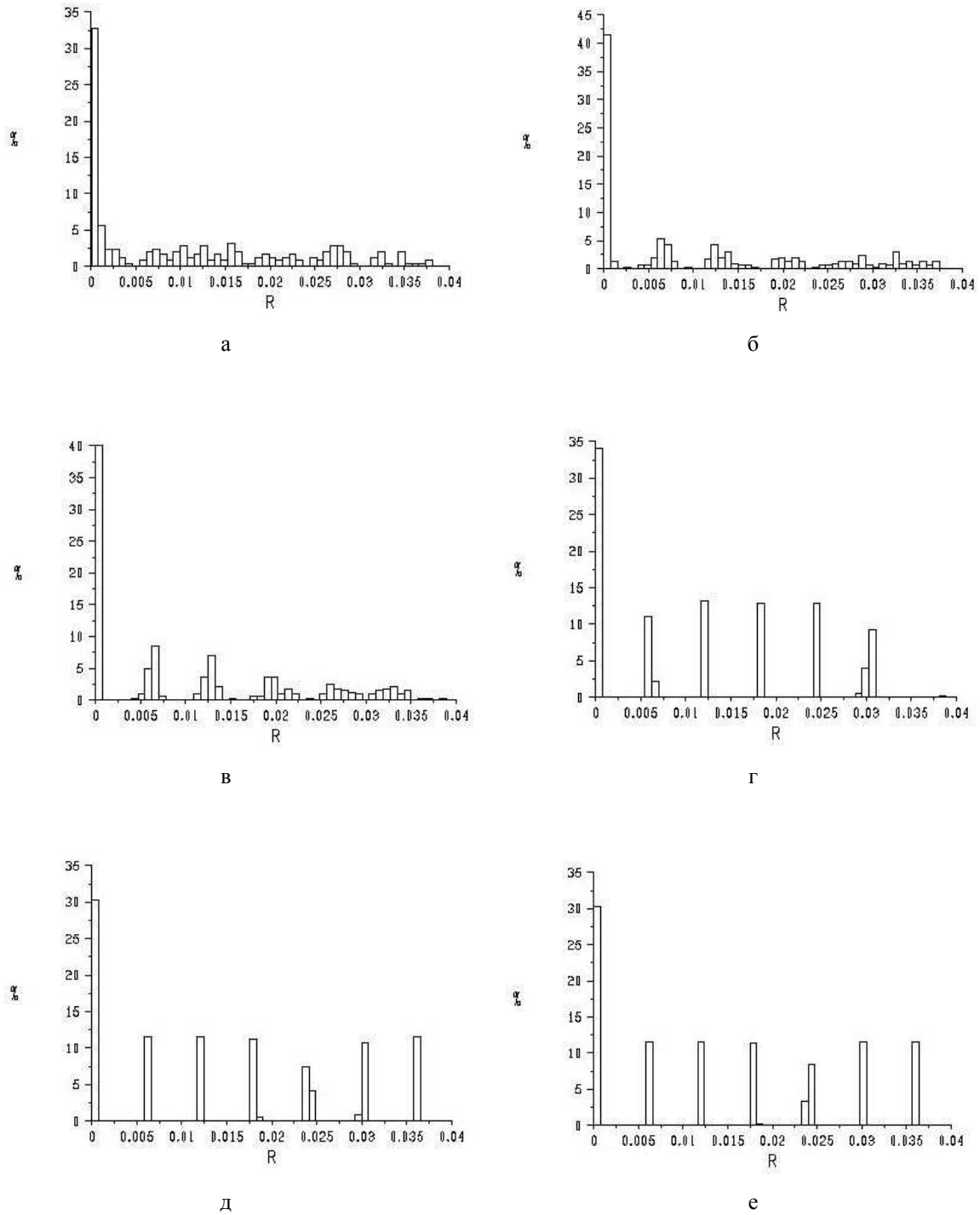


Рис.7. Гистограмма мест падения частиц в процентах на регистрационную пластину в зависимости от радиальной координаты для расхода  $G = 0.004$  кг/с (геометрия рис. 2): а - при  $d = 1$  мкм, б - 2, в - 3, г - 5, д - 10, е - 15

Из набора построенных гистограмм можно сделать вывод, что для выбранного расстояния  $h=3$  мм при всех рассмотренных расходах достигается удовлетворительная фокусировка частиц. Для расстояния  $h= 4$  мм фокусировка падающих частиц остается допустимой, но несколько ухудшается, особенно при малых расходах. При этом также возрастает процент «потерянных», частиц, как это будет видно из результатов, представленных на рис. 9

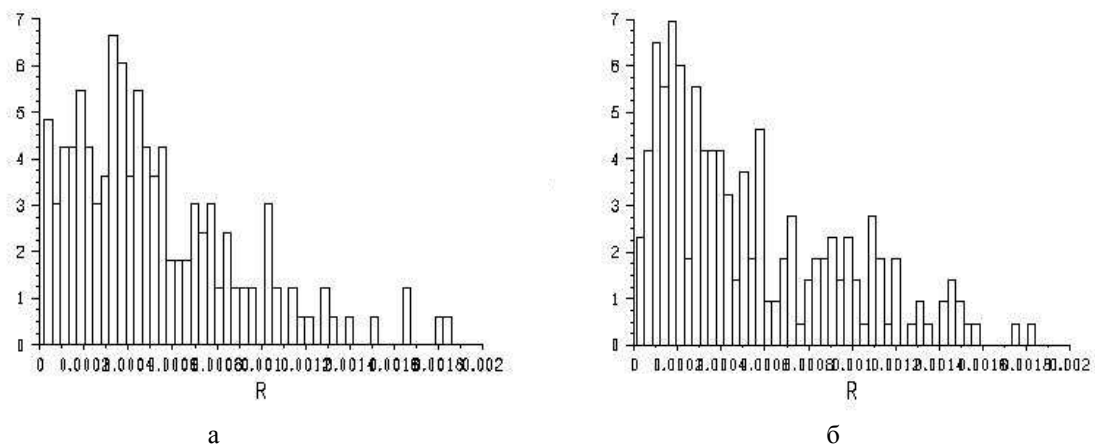


Рис. 8. Гистограмма мест падения частиц размером 1мкм при расстоянии до измерительной плоскости 3мм при различных расходах: а)  $G=0.001$  кг/с, б) – 0.002

Результаты обработки по дисперсии распределения частиц на измерительной плоскости относительно проекции центра отверстия на эту плоскость показаны на рис. 9.

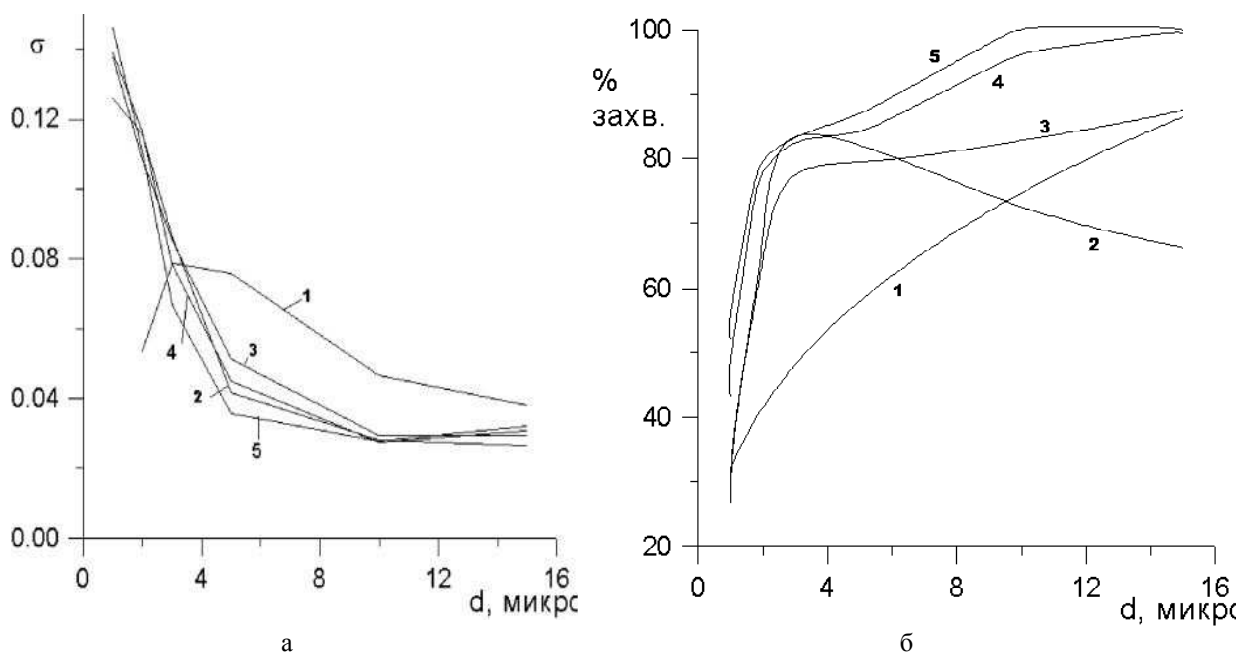


Рис. 9 Дисперсия (а) и процент захваченных частиц (б) в зависимости от расхода и диаметра частиц: 1 –  $G=0.0005$  кг/с, 2 –  $G=0.001$  кг/с, 3 –  $G=0.002$  кг/с, 4 –  $G=0.003$  кг/с, 5 –  $G=0.004$  кг/с

Дисперсия разлета частиц на уровне 0.1 и ниже наблюдается при всех расходах из диапазона  $G=0.001-0.004$  кг/с. Для частиц, размер которых порядка 15 мкм, она снижается до 0.04 вне зависимости от расхода. Для частиц из середины диапазона ингаляции дисперсия разлета зависит от расхода и увеличивается с уменьшением расхода. Для малого расхода порядка  $G=0.001$  и ниже дисперсия разлета, т.е. качество фокусировки, является немонотонной функцией радиуса частицы.

**Выводы.** Проведенное исследование позволяет выбрать оптимальную геометрию устройства, расход воздуха через приемную кассету, форму сопла и другие конструктивные характеристики. На основании численных расчетов можно рекомендовать оптимальное расстояние от среза сопла до поверхности измерительной пластины, при котором обеспечивается удовлетворительная фокусировка и 80 %-й уровень захвата частиц размером более 3 мкм.

### **Литература**

1. Брок Т. Мембранная фильтрация. М.: Мир, 1987. 464 с.
2. Sensor Systems for Biological Agent Attacks // Protecting Buildings and Military Bases. Washington D.C.: Academic Press, 2004.
3. Fuchs N. A. The mechanics of aerosols. N.Y.: The Macmillan Co. 1964.
4. Macher J. M. Positive-hole correction of multiple-jet impactors of collecting viable microorganisms. // Am. Inc. Hyg. Assoc. J. 1989. Vol. 50(51). Pp. 561-589.