

Н.И. Бахтин

(Южно-Российский государственный технический университет
(Новочеркасский политехнический институт); e-mail: kol65536@gmail.com)

МЕТОД АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ОБЕСПЫЛИВАЮЩИХ АППАРАТАХ

Аннотация. В данной статье представлена работа, посвященная проблемам очистки газовых потоков от пыли. Создание современных обеспыливающих аппаратов невозможно без использования специализированных САПР, позволяющих осуществить моделирование процессов, происходящих в аппарате. Данная статья посвящена решению проблемы создания алгоритмов, пригодных для использования в программных комплексах САПР. В статье представлен алгоритм и его программная реализация.

Ключевые слова: обеспыливание, моделирование аэродинамических процессов, системы автоматизированного проектирования.

N.I. Bakhtin

THE METHOD OF AERODYNAMIC SIMULATION OF DUST EXTRACTION APPARATUS

Abstract. This article presents work on the problems of cleaning gas flows from the dust. Creating modern dust extraction devices is impossible without the use of specialized CAE will lead to a simulation of the processes occurring in the apparatus. This article addresses the problem of creating algorithms that are suitable for use in CAE software complexes. The paper presents an algorithm and its implementation.

Key words: dust aspiration, aerodynamic simulation, CAE.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 21 июня 2010 г.

Прогнозирование и анализ эффективности конструкции современных обеспыливающих аппаратов представляет собой самостоятельную задачу. Экспериментирование на натурной модели имеет серьезные недостатки – оно требует больших материальных и временных затрат, также весьма затруднительным представляется получение информации о пространственном распределении основных физических величин внутри аппарата.

Использование компьютерного математического моделирования позволяет обойти эти трудности. Математическое моделирование не требует создания реальных установок и позволяет рассматривать различные конструкционные варианты без существенных материальных затрат.

В виду сложности комплексных систем обеспыливания, большого числа переменных и ограничений, неполноты и вероятностного характера исходной информации, разработка этих систем возможна лишь на основе достаточно полных имитационных моделей, реализуемых с помощью ЭВМ в виде вычис-

лительных экспериментов.

Поэтому представляется актуальной разработка достаточно эффективных имитационных моделей физико-химических процессов в аппаратах, осуществляющих обеспыливание.

Задачу движения газопылевого потока в аппарате предложено разделить на две отдельные подзадачи.

В первой подзадаче проводится аэродинамический расчёт аппарата. На данной стадии определяется характер движения воздуха без учета движения пылевого потока. Результатом работы программы будет распределение скоростей потоков воздуха в объёме обеспыливающего аппарата. Эти данные будут использоваться на следующей стадии моделирования.

На втором этапе проводится моделирование движения газопылевых потоков методом Монте-Карло. Программой генерируется большое количество пылевых частиц. Каждая из этих частиц характеризуется положением в пространстве, массой и скоростью. На скорость движения частиц пыли оказывает влияние направление и величина скорости движения воздушных потоков, рассчитанная на первом этапе.

Реализация второй стадии не столь сложна, по сравнению с первой стадией.

В работе представлен новый метод моделирования, позволяющий проводить аэродинамические расчёты аппаратов. Данный метод предназначен для двумерного моделирования плоских течений. Метод базируется на использовании неравномерной сетки, построенной из элементарных треугольников. Совокупность треугольников позволяет описать сложную внутреннюю конструкцию аппарата. В отличие от классической равномерной сетки данная сетка позволяет более корректно описать геометрические объекты сложной формы, так как в равномерной сетке большинство поверхностей будут иметь ступенчатую форму, что ухудшает качество моделирования.

В данном методе рассматривается газ, в котором частицы не взаимодействуют друг с другом, а могут лишь отскакивать от поверхностей твёрдого тела, ограничивающего моделируемый объём. До момента столкновения частица движется равномерно прямолинейно. Несмотря на то, что подобное допущение является весьма существенным, результат моделирования, основанного на данной концепции, вполне может применяться в качестве первого приближения для последующих стадий расчёта физико-химических процессов, происходящих в обеспыливающем аппарате.

Введение подобных допущений даёт возможность описать состояние системы в каждый момент времени лишь одним типом физического параметра – массой воздуха. В каждом элементарном объёме вся масса воздуха делится на группы, в зависимости от направления частиц (рис. 1). Считается, что в каждой группе находятся молекулы, движущиеся в строго определенном направлении с одинаковой скоростью, равной средней скорости движения молекул при заданной температуре. Совокупность всех групп должна, с определенной дискретностью, охватывать все возможные направления.

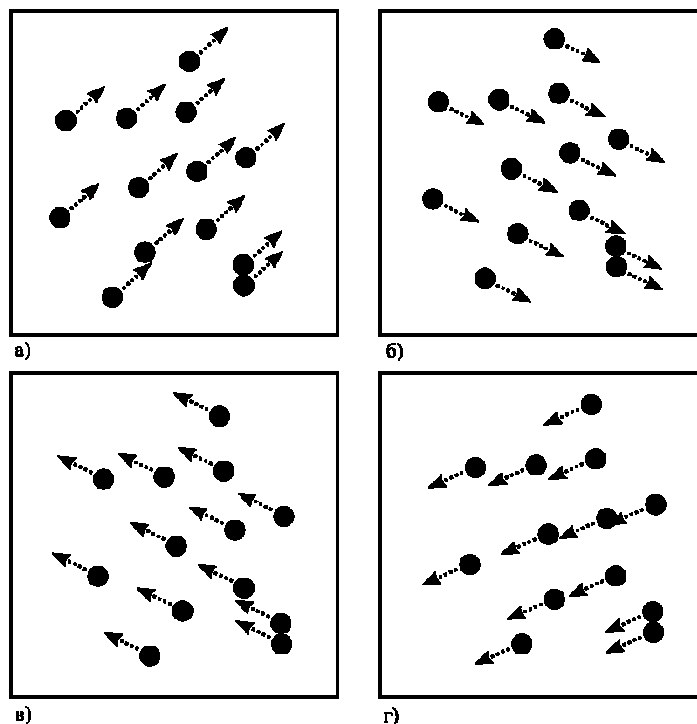


Рис. 1. Пример разделения частиц на несколько групп по направлениям их движения

Если масса по всем направлениям распределена равномерно, то воздух находится в состоянии покоя. Это связано с тем, что суммарный импульс в данном случае будет равен нулю. Отсюда следует, что скорость воздуха равна нулю. Если скорость воздуха будет отлична от нуля, то это говорит о том, что в какой-то группе направлений есть преобладание массы.

Видно, что данная характеристика, состоящая из набора масс, заменяет собой физические параметры сетки в классических алгоритмах аэродинамического расчёта, таких как давление, скорость воздуха и плотность воздуха. Несмотря на то, что масс много, тип физической величины один. Это существенно упрощает расчётные формулы.

Также следует заметить, что данный подход естественным образом решает проблему связанности физических величин. Если рассматривать классические параметры расчётной сетки, то ничто не мешает задать их значения в ячейке так, чтобы в данной ячейке отсутствовала масса (плотность равна нулю) и при этом присутствовало давление и скорость воздуха. Такая ситуация физически бессмысленна, однако многие используемые алгоритмы допускают такую возможность [1]. Особенно следует обратить внимание на то, что подобные вещи допускает метод конечного объёма, который является основным методом аэродинамического расчёта, применяемым на сегодняшний день.

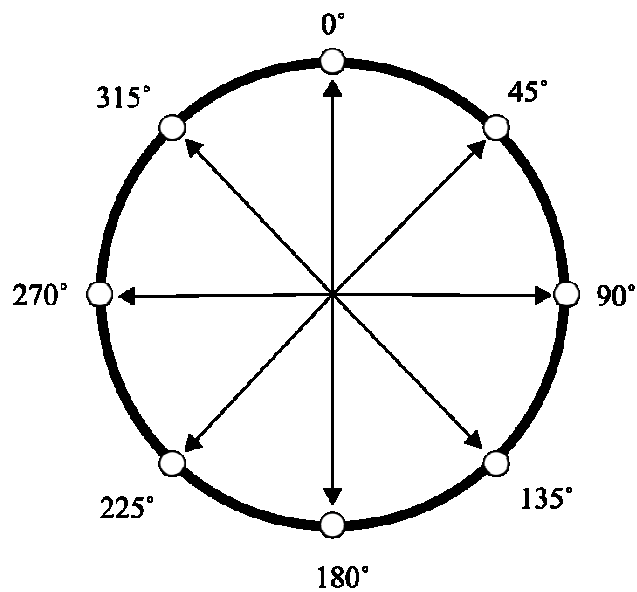


Рис. 2. Пример разделения полного круга на конечный набор направлений. На данном рисунке 8 направлений. Для большей точности в реальном расчёте используется 400 направлений

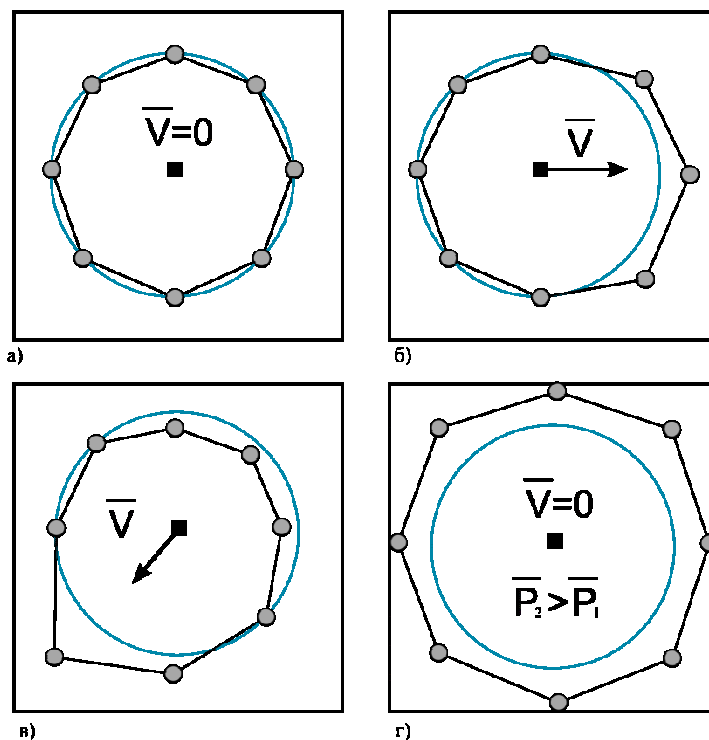


Рис. 3. Примеры распределения масс по направлениям внутри одной элементарной ячейки:
 \bar{V} – скорость воздуха, P_1 – давление воздуха на рисунке а,
 P_2 – давление воздуха на рисунке г

Из данной характеристики (совокупность масс) мы можем получить все остальные физические параметры.

Плотность определяется по формуле

$$\rho = \frac{\sum_j m_j}{\Omega}, \quad (1)$$

где m_j – масса одного направления;

Ω – объём ячейки.

Скорость движения воздуха определяется по формуле [2]

$$\bar{v} = \frac{\sum_j m_j \bar{v}_j}{m}, \quad (2)$$

где m_j – масса j -го направления;

\bar{v}_j – скорость j -го направления;

m – суммарная масса воздуха в элементарном объёме.

Для нахождения давления воздуха найдем сначала внутреннюю энергию.

$$E_e = E - E_k, \quad (3)$$

где E – общая энергия (она численно равна суммарной кинетической энергии движущихся частиц в элементарном объёме);

$E_k = \frac{m\bar{v}^2}{2}$ – кинетическая энергия движения воздуха, как макрообъекта

сплошной среды;

E_e – внутренняя энергия.

Давление воздуха определяется по формуле

$$p = (\chi - 1)\rho\varepsilon, \quad (4)$$

где χ – показатель адиабаты;

$\varepsilon = E_e / m$ – внутренняя энергия единицы массы;

ρ – плотность воздуха.

Как правило, при моделировании физическое состояние системы в каждый момент времени определяется сеткой, каждый элемент которой представляет собой элементарный объём, состояние которого можно описать конечным набором параметров. Если какой-то из параметров является пространственной характеристикой, то считается, что он имеет одно и то же значение в каждой точке элементарного объёма.

В предложенном методе совокупность групп масс по всем направлениям будет единственной характеристикой, описывающей состояние каждой отдельно взятой ячейки моделируемой сетки.

Процесс моделирования делится на две части. В первой части вычисляются постоянные коэффициенты, которые будут оставаться неизменными в ходе всего основного расчёта. Причем расчёт этих коэффициентов является наиболее трудоёмкой задачей. Большим преимуществом данного метода аэродинамического моделирования является то, что наиболее трудоёмкие операции можно вынести за пределы основного цикла расчёта, рассчитав их лишь один раз, и этот результат многократно использовать в основном вычислительном

цикле моделирования, где "проигрываются" изменения состояния системы во времени.

В первой "предварительной" стадии рассчитывается таблица коэффициентов переброски масс из заданного треугольника в другие для каждого направления. Предполагается, что все молекулы воздуха движутся с одинаковой по величине скоростью, равной средней скорости молекул воздуха при заданной температуре.

Полагаем, что молекулы каждой группы равномерно распределены по объёму ячейки. Соответственно совокупность молекул в одной группе можно представить как отдельный объект, имеющий форму ячейки. Далее будем называть его *псевдочастицей*. Таких псевдочастиц будет столько, сколько групп направлений. В данной статье количество групп направлений равно 400. То есть полный круг – 360 градусов, разделен на 400 равных частей. Так как все молекулы к каждой группе движутся в одном направлении, то можно описать движение всех молекул как движение псевдочастицы, образованной из молекул данной группы. В качестве одного из настроечных параметров задается интервал времени Δt . В течение этого интервала времени псевдочастица движется по прямой в направлении своей группы скорости и смещается на некоторое расстояние (рис. 4). После смещения фигура частично перекроет площади соседних элементарных объёмов треугольной сетки. Отношение перекрытой площади к площади всей фигуры характеризует отношение массы молекул, попавших в данный элементарный объём, к массе всех молекул смещенной псевдочастицы (рис. 5).

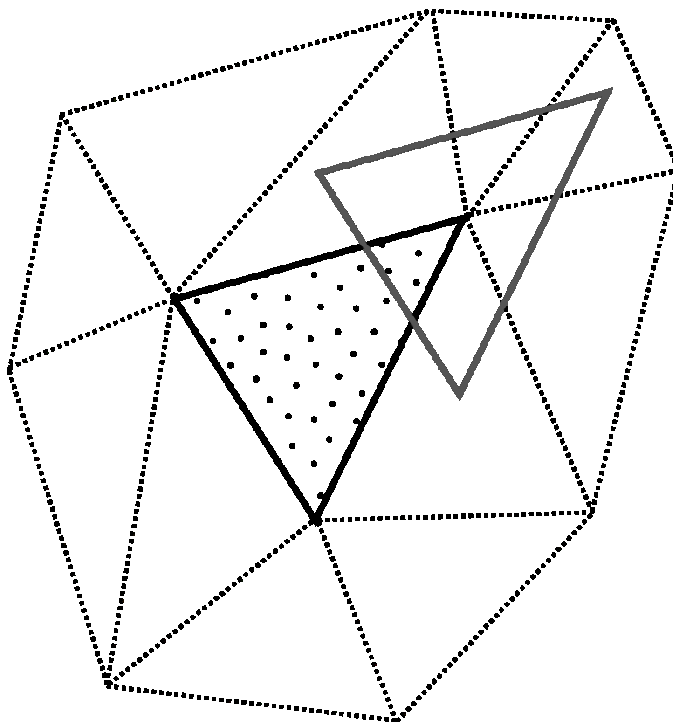


Рис. 4. Пример смещения одной из псевдочастиц за время Δt

После перемещения фигура псевдочастицы будет разделена треугольной сеткой на более мелкие фигуры. Так как молекулы внутри псевдочастицы распределены равномерно, то пропорции площадей этих малых фигур будут равны пропорциям распределения масс малых фигур.

На данной стадии не рассчитывается непосредственно величина массы, перенесённой из одной ячейки в другие. Вместо этого ставится задача определить, в какие треугольники сетки будет перенесена масса и в каких пропорциях.

Подобная операция осуществляется для каждой группы направлений в отдельно взятой ячейке.

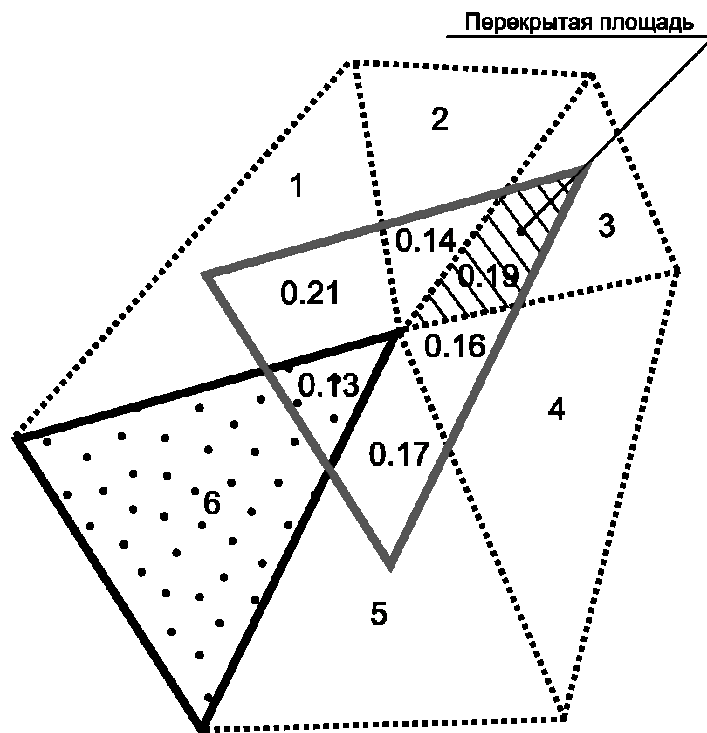


Рис. 5. Пример деления площади смещенной псевдочастицы элементами сетки

По причине того, что непосредственные отношения площадей посчитать трудно, мы обходим эту трудность следующим образом. Каждая фигура, в нашем случае это треугольник, разбивается на более мелкие треугольники путем многократного разбиения каждого из них на четыре (рис. 6).

Деление осуществляется по серединам сторон треугольника. По причине особенностей данного способа разбиения, конечные треугольники будут подобны исходному. Если треугольник будет очень маленьким, то его форма уже не играет серьезной роли и его можно представить как материальную точку, которая несет в себе часть массы псевдочастицы. Однако для того, чтобы определить, какую часть от общей массы несет в себе этот треугольник, надо знать площадь этого треугольника. Для четкого определения этой величины мы и осуществляем полноценное деление на мелкие элементы по заданной схеме. Когда каждый большой треугольник будет разбит на огромное количество очень мелких, в каждом из этих мелких треугольников вычисляется средняя точка и рассчитывается движение этой точки по треугольной сетке. Полагаем, что туда, куда попадет эта точка после перемещения, переносится часть массы, закрепленная за малым треугольником.

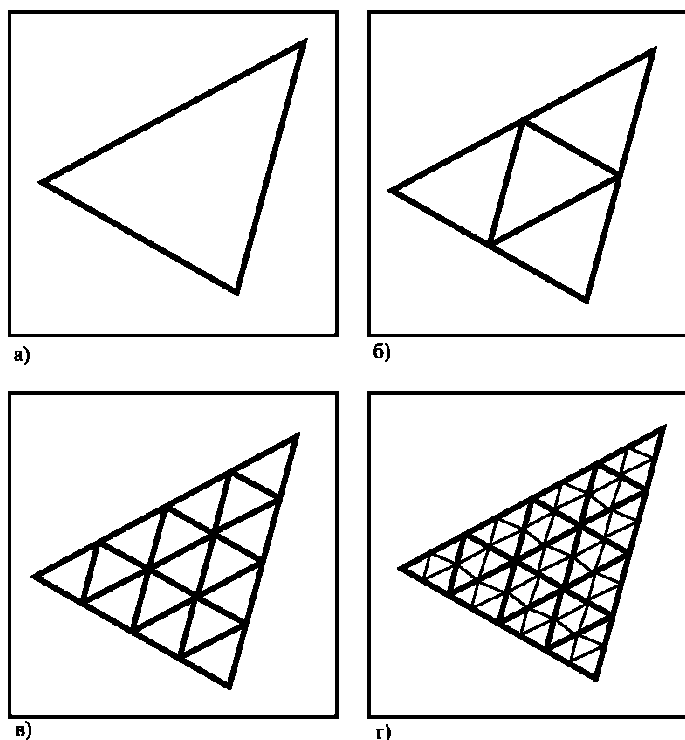


Рис. 6. Примеры разделение треугольника на более мелкие элементы.

Помимо этого, подход с разбиением на более мелкие треугольники позволяет легко решить проблему взаимодействия со стенками, ограничивающими моделируемый объём. Считается, что материальные точки совершают упругое соударение со стенками. Если такое происходит, то форма фигуры псевдо-частицы после смещения может быть отличной от формы исходной ячейки треугольной сетки. Это будет наблюдаться в случае частичного отражения псевдо-частицы от стенки.

Определив, в какие элементы сетки попали малые треугольники, мы можем для каждого такого элемента рассчитать коэффициент, представляющий собой отношение суммарной площади треугольников, попавших в элемент сетки, к общей площади фигуры. Для каждого направления одного из элементов сетки будет несколько таких коэффициентов. Каждый из таких коэффициентов будет характеризовать процент переноса массы из расчётного элемента в соседние элементы сетки для данного направления.

Подобным образом расчёт производится по всем направлениям для каждого из треугольников сетки. В итоге мы получаем множество коэффициентов, характеризующих перемещение масс из одних ячеек сетки в другие.

Во второй фазе расчётов используется таблица коэффициентов, полученная на предыдущей стадии расчёта. Масса воздуха в каждой группе направлений умножается на коэффициенты и заносится в другие треугольники. В итоге мы получаем состояние системы в следующий момент времени.

Таким образом, во второй фазе расчётов моделируется процесс движения воздушных потоков в аппарате во времени.

Расчётный комплекс состоит из нескольких программ. Одна из программ загружает из файла в оперативную память треугольную сетку, описывающую

моделируемый объект и осуществляет первую фазу расчёта. В ходе этой фазы формируется таблица коэффициентов в виде группы бинарных файлов. Особенности алгоритма позволяют достаточно легко распараллелить вычислительный процесс на несколько отдельных потоков без необходимости синхронизировать потоки между собой. Это связано с тем, что данные, которые будут общими для всех потоков, не изменяются в ходе работы алгоритма. Возможность разделить все вычисления на несколько потоков позволяет алгоритму эффективно использовать возможности современных многоядерных процессоров.

После работы программа сформирует несколько файлов. Один из выходных файлов программы хранит в себе информацию о структуре таблицы коэффициентов. Остальные, по одному на каждый поток – вычисленные коэффициенты. Такое разбиение на несколько файлов вызвано необходимостью обеспечить независимую друг от друга работу потоков. Каждый из них записывает данные в свой файл.

Вторая программа загружает сформированные файлы с коэффициентами и осуществляет вторую фазу расчёта. В этой фазе определяется состояние системы в разные моменты времени. Полученное состояние системы на каждом шаге итерации сохраняется в отдельный файл. В итоге мы получаем совокупность файлов, которая описывает изменение системы во времени.

Для просмотра этих файлов написана отдельная программа на языке C#. Программы первой и второй фаз расчёта написаны на языке C++, так как на этом языке легче писать эффективные по производительности и потреблению памяти программы. C# же более удобен для создания приложений с графическим интерфейсом пользователя.

Результат моделирования представлен на рис. 7.

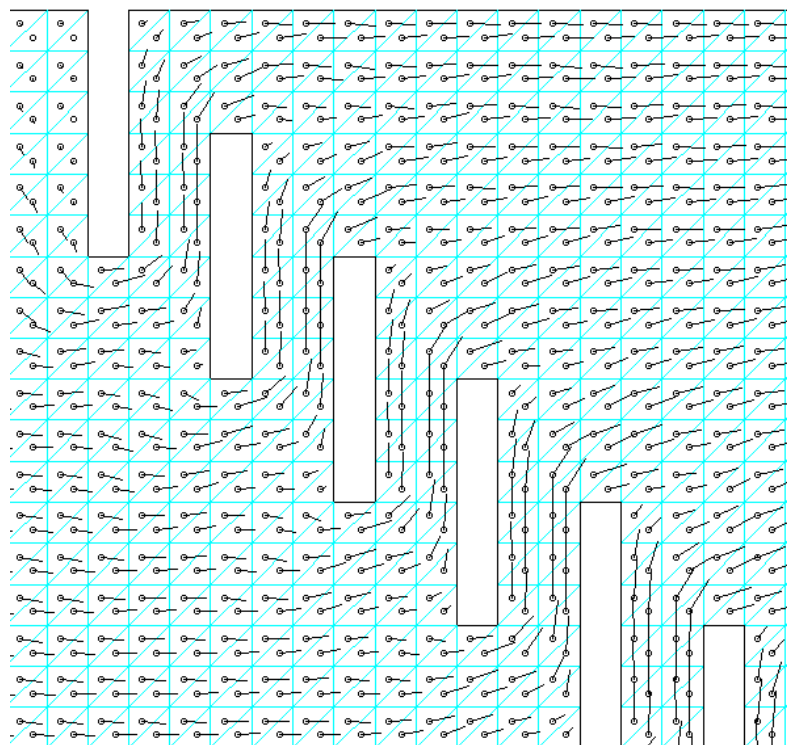


Рис. 7. Результат моделирования. Фрагмент

В данной работе предложен принципиально новый метод моделирования плоских течений в обеспыливающем аппарате. Этот метод удобен для моделирования процессов в аппарате сложной геометрической формы. Несмотря на существенные допущения, имеющиеся в методе, результаты работы данного алгоритма могут использоваться в качестве приближенного решения для дальнейшего моделирования газопылевого потока методом Монте-Карло. Данная модель может быть полезна при создании САПР, решающих задачу поиска слабых мест в системах обеспыливания. Она может оказать помощь на этапе конструирования новых аппаратов.

Данный алгоритм не опирается на классическую концепцию представления газа как сплошной среды. Он может применяться для описания физических процессов, когда длина свободного пробега молекул соизмерима с характерным размером течения (длина обтекаемого тела, длина трубопровода и т. д.). То есть при числе Кнудсена (Kn) близком или большем единицы [3]. Такая ситуация характерна для сильно разреженных газов либо при рассмотрении аэродинамических процессов на наноуровне.

Литература

1. **Численное** решение многомерных задач газовой динамики / Под ред. С.К. Годунова. М.: Наука 1976.
2. **Гиргидов А.Д.** Механика жидкости и газа (гидравлика): Учебник для вузов. 3-е изд., испр. и доп. С.-Пб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 545 с. ISBN 5-7422-0258-1.
3. **Вычислительные** методы в динамике разреженных газов / Под редакцией В.П. Шидловского. М.: Издательство "Мир". 1969.