

Имитационное моделирование 2D-фильтрации на основе событийного подхода

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского «ХАИ»

Введение

Математическая теория процессов внутри рабочих областей фильтров очень сложна. Это связано, в первую очередь, с неньютоновским характером течений, поскольку частицы включений имеют, как правило, особые химико-физические свойства. В частности, размеры частиц, из которых состоят включения, могут быть гораздо большими, чем размеры частиц основного вещества. К тому же форма частиц включений может быть самой разнообразной [1 – 3].

В данной работе использован подход, описанный в работах [4 – 8] и заключающийся в следующем.

Вещество представлено в виде совокупности модельных частиц. Рабочая область разбита на подобласти, обычно имеющие вид квадратов (или кубов в 3D случае). Каждая частица и каждая подобласть являются объектами, обладающими свойствами автоматов. Свойства объектов-частиц – это их размеры, массы, координаты, скорости, локальное время, время наступления ближайшего события и т.п. Свойства объектов-подобластей – это геометрические параметры, а также списки частиц, принадлежащих подобласти. Ведущим параметром является время. События считаются происходящими мгновенно в некоторый момент времени. Событиями являются столкновения модельных частиц, пересечения частицами границ подобластей, столкновения частиц с границами рабочей области, влет – вылет частиц из рабочей области и вывод информации.

События в целом упорядочены по возрастанию моментов времени их наступления. В наименьший момент времени структуры объектов, участвующих в соответствующем событии, перестраиваются. Законы такой перестройки являются методами, присущими рассматриваемым объектам. К методам относится также расчет тех событий, которые могут произойти в дальнейшем. Новые события ставятся в очередь.

Одной из простейших моделей вещества является модель твердых сфер. К ней полностью применим и является эффективным событийный подход [3 – 8].

Формулирование проблематики

С помощью стандартного метода твердых сфер невозможно описать тела сложной формы. В данной работе предлагается рассмотреть не только внешние, но и внутренние столкновения. Предположим, две сферы расположены так, что расстояние между их центрами меньше, чем сумма радиусов. В какой-то момент времени в процессе их равномерного перемещения расстояние между центрами станет равным сумме радиусов. Это и есть момент внутреннего столкновения. Если предусмотреть обработку события, аналогичную упругому отражению, то в дальнейшем сферы останутся связанными.

Свойство связанности будет соблюдаться также и для целой совокупности сфер, если для каждой из них найдется в начальный момент времени соседняя, т.е. такая, что расстояние между их центрами не превысит суммы радиусов.

Если же в начальный момент времени две сферы расположены далеко друг от друга, то их возможное столкновение будет внешним, и после отталкивания они разлетятся.

Таким образом, решению подлежат следующие задачи.

1. Разработать алгоритм начального формирования частиц включений.
2. Осуществить алгоритмическое распознавание модельных частиц основного вещества и включений.
3. Реализовать алгоритм течения основного вещества с включениями в рабочей области фильтра в целом.

Решение поставленных задач

Пусть отдельное включение задано как область, описываемая неравенством $f(x,y) \leq 0$. Рассмотрим множество окружностей, центры которых образуют правильную треугольную сетку. Шаг сетки выберем несколько меньшим, чем диаметр модельных частиц, из которых состоят включения. Отберем те частицы, координаты (x,y) центров которых удовлетворяют неравенству $f(x,y) \leq 0$, и произведем их последовательную нумерацию. Для каждой из отобранных частиц предусмотрим отдельное поле, представленное в виде динамического одномерного массива. Заполним этот массив, занеся в него номера тех частиц, центры которых удалены от центра рассматриваемой частицы на расстояние, меньшее диаметра. Это соответствует составлению массива номеров соседних частиц. В плоском случае максимальное количество соседей равно шести. Всем частицам припишем их типы. Для частиц, входящих в состав всех включений, этот тип задан в виде числа «1». Тип модельных частиц основного вещества зададим равным нулю. Тем самым осуществляется начальная классификация всех частиц.

Предположим, исследуется возможное столкновение двух частиц. Для этого производится поиск моментов их взаимных столкновений. Если такие моменты действительны, то их обычно два. Пусть частицы имеют тип «0», или принадлежат к одному типу «1», но не являются соседними, или их типы различны. Тогда из двух моментов анализируется наименьший; в случае его положительности событие «столкновение» считается возможным. Если частицы принадлежат типу «1» и являются соседними, то из двух моментов рассматривается наибольший. Он может считаться моментом наступления возможного столкновения, которое в данном случае является внутренним.

Обработка любого события, соответствующего столкновению двух модельных частиц, производится единообразно, вне зависимости от того, внутренним или внешним оно является, поскольку сводится к вычислению новых скоростей после упругого столкновения.

Результаты расчетов

Рассматривается двумерное течение газа или жидкости в прямоугольной области. Вектор основного течения направлен слева направо. Движение среды осуществляется таким образом, что в рабочей области сохраняется количество движущегося вещества. С этой целью то количество вещества, которое покидает

рабочую область на правом срезе, передается на вход, т.е. на левый срез. Верхняя, нижняя и левая границы области считаются отражающими.

В рабочей области располагаются фильтры. Каждый фильтр – это набор одинаковых прямоугольников с отражающими границами, расположенных параллельно верхней и нижней границам рабочей области с соблюдением постоянства расстояний между последовательными прямоугольниками.

Кроме основного вещества в движении участвуют включения, представленные частицами, обладающие формой, близкой к прямоугольной. Включения обладают теми или иными свойствами упругости или изгибаемости. В начальный момент в данной задаче включения считаются расположенными в некотором порядке между передним срезом и первым слева фильтром. С течением времени включения перемещаются под действием сил, оказываемых со стороны основного вещества. Они изменяют сопротивление фильтров движению вещества. При большом их количестве движение может совсем прекратиться, что означает заклинивание тракта.

Требуется описать изменение со временем количества вещества, проходящего через правый срез, в зависимости от количества включений и их геометрических параметров.

Вещество с включениями – это двухфазная среда. Основное вещество, перемещающееся в рабочей области, представлено абсолютно упругими сферами. При решении рассматриваемой задачи основным является метод описания включений, использующий дискретно-событийный подход. Включения представляются совокупностями окружностей, собранных в слои. Каждый слой – это нить, составленная из окружностей, причем расстояния между центрами соседних окружностей меньше суммы радиусов этих сфер. Каждый слой сдвинут относительно соседних слоев так, что в целом окружности плотно упакованы, т.е. их центры расположены в начальный момент времени в вершинах правильных треугольников. Разнообразие форм включений обеспечивается выбором как количества окружностей в одной нити, так и количеством слоев. Чем меньше слоев, тем более гибкой является каждая частица включений. Если количество слоев превышает 3, то включения можно считать упругими отрезками, мало изменяющими форму при движении.

В данной работе используется также и тот вариант, когда скорости в системе центра инерции после расчета упругого отражения нормируются. Это делается для имитационного моделирования течения не газа, а жидкости.

С помощью разработанной программы Filter0 допустимо моделирование течения при наличии постоянной силы, действующей либо сверху вниз, либо слева направо. В этом случае включения могут перемещаться и без модельного вещества.

После каждого такта выводится значение глобального времени (t_{global}), а в специальном окне – отношение количества частиц основного вещества, исчезнувших на правом срезе, к общему их количеству ($stream$). Это позволяет контролировать поток газа (жидкости). Дополнительно в отдельный файл выводятся t_{global} , $stream$, а также отношение количества частиц, покинувших рабочую область за один такт, к длительности такта ($power$). Имя файла состоит из количества нитей, длины отдельной нити и количества слоев. Имя файла сопровождается соответствующие графики.

На рис. 1 приведен пример графического представления прохождения потока с включениями через рабочую область. Количество частиц основного вещества в обоих случаях равняется 5000.

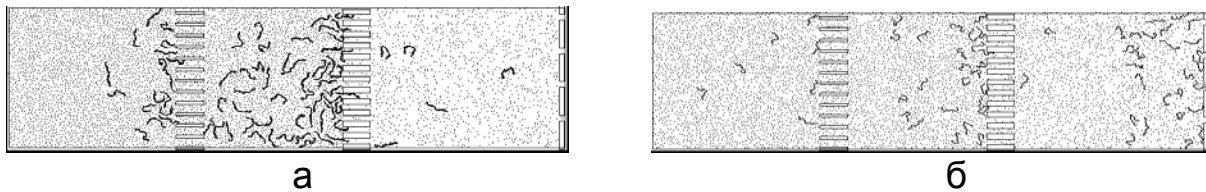


Рис. 1. Потoki с включениями :
 а – количество включений – 144, длина нитей – 15, количество слоев – 2;
 б – количество включений – 60, длина нитей – 15, количество слоев – 1

Эффективность конструкции фильтра в целом определяется зависимостью его пропускной способности от геометрических параметров фильтра и включений. Для ее вычисления сравниваются потоки, проходящие при отсутствии включений и в рабочем режиме. На рис. 2 приведены графики зависимости пропускной способности от времени для различных количеств включений в случае, когда каждое включение является нитью длины 3, а общее количество частиц основного вещества равно 20000. При каждом значении времени можно вычислить, как снижается пропускная способность по сравнению с потоком основного вещества без включений.

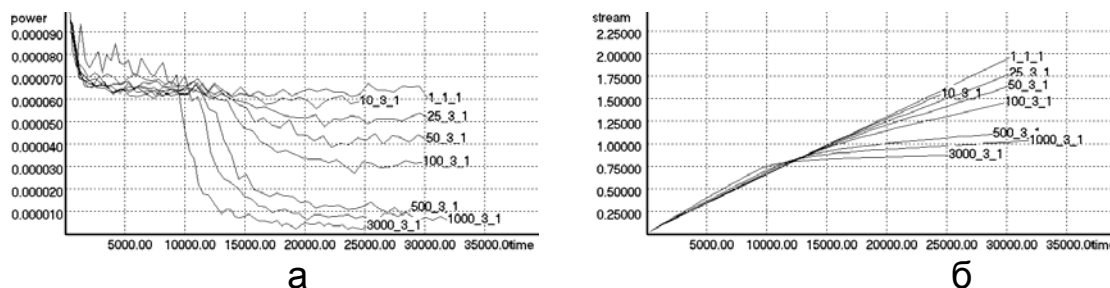


Рис. 2. Графики зависимости от времени:
 а – пропускной способности; б – суммарного потока

Дополнительные возможности предложенного метода

С помощью предложенного метода оказывается осуществимым в рамках той же программы Filter0 имитационное моделирование таких явлений, как сепь, просеивание взвесей и т.п. [7]. Достаточно положить количество модельных частиц основного вещества равным нулю и подключить гравитацию. На рис. 3 приведено несколько последовательных конфигураций селевого потока; количество модельных частиц включений равно 2400. На пути потока предусмотрены препятствия как вырожденные профили фильтров. Одна из задач – оптимизировать параметры препятствий, исходя из их стоимости. Целевой функцией является количество модельных частиц включений, оказавшихся справа от последнего из препятствий. Это количество подлежит минимизации.

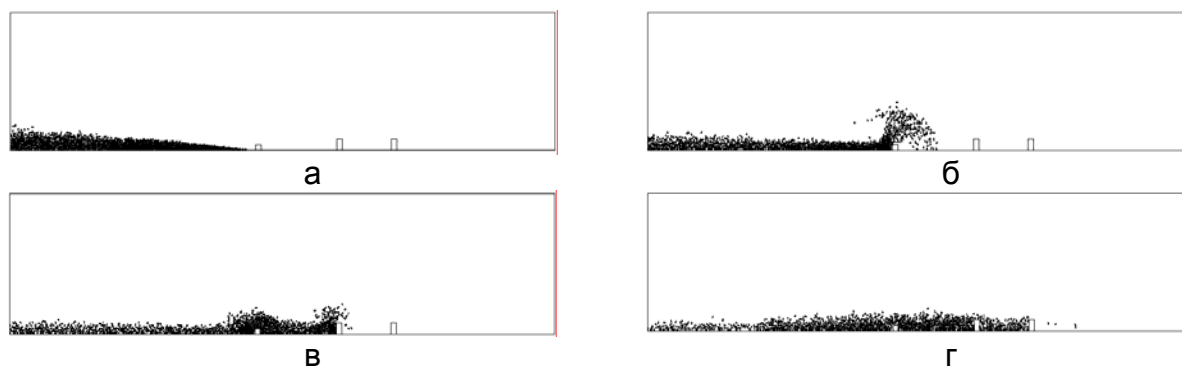


Рис. 3. Фрагменты развития селевого потока

Выводы и заключение

Те изменения в методе твердых сфер, которые достаточны для описания связанных конфигураций, минимальны. Это позволяет без существенного усложнения алгоритма производить имитационное моделирование поведения многофазных сред, причем допустимы фазы, состоящие из крупных включений.

Процедура поиска событий и их обработка укладываются в схему парного взаимодействия при наличии потенциала типа отражающей стенки [8]. Однако во внимание принято то, что расстояния между частицами могут быть как больше, так и меньше предельного расстояния.

Список литературы

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа – М.:Наука, 1987. – 840 с.
2. Schutyser Maarten, Belfort Georges. Dean vortex membrane microfiltration non-Newtonian viscosity effects. – Chem. Res. – 2002, 41. – № 3. – С. 494 – 504.
3. Kerr W., Spears D., Spears W., Thayer D. Multi-agent Sweeping and Obstacle Avoidance / Springer-Verlag. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 3228, [2004 // wkerr@cs.uwyo.edu](mailto:wkerr@cs.uwyo.edu)
4. Чернышев Ю.К. Прямое моделирование течения газа в каналах сложной формы при малых числах Кнудсена //Труды Междунар. науч.-техн. конф. «Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования». – Х.: Ин-т проблем машиностроения НАН Украины. – 1997. – С. 238 – 240.
5. Чернышев Ю.К. Применение теории систем для алгоритмизации прямого математического моделирования течения газа // Двигатели внутреннего сгорания. – 2004. – № 2. – С. 44 – 47.
6. Чернышев Ю.К. Решение задач имитационного моделирования поведения большого количества модельных частиц. – Х.: ХАИ, 2006. – 58 с.
7. Слепичева М.А., Чернышев Ю.К. Имитационное моделирование потока объектов с учетом поля предпочтительных направлений // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т.»:– 2006. – Вып. 33. – С. 83 – 88.
8. Чернышев Ю.К. Дискретно-событийное моделирование процесса 2D-кристаллизации // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т.»:– 2007. – Вып. 34. – С. 102 – 109.