

Летняя школа-конференция по параллельному программированию 2024

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОЙ СИСТЕМЫ КЛЕТОЧНО-АВТОМАТНОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ**

Докладчик: Бурнышев Егор Константинович, выпускник ФИТ НГУ

Научный руководитель: Медведев Юрий Геннадьевич, к.т.н., доц. каф. ПВ ФИТ НГУ

Новосибирск, 2024

Актуальность

Признанным отечественным лидером в области моделирования газодинамических процессов является пакет **ЛОГОС Аэро-Гидро**. При решении задач в ЛОГОС Аэро-Гидро **отсутствует возможность** использовать методы, которые не базируются на аппроксимации дифференциальных уравнений и систем. В частности, нельзя выбрать клеточный автомат (КА), как метод имитации.

На текущий момент в программной реализации модели FHP-MP, разработанной в лаборатории синтеза параллельных программ ИВМиМГ СО РАН, **существует проблема** отсутствия автоматизированного механизма задания начальных и граничных условий. Так же у исследователей **существует потребность** в переносе расчётных конечно-элементных моделей из ЛОГОС Аэро-Гидро в FHP-MP. Поэтому **разработка программной системы клеточно-автоматного моделирования газовых потоков**, удовлетворяющей описанным выше запросам пользователей, безусловно, **является актуальной**.

Цели и задачи

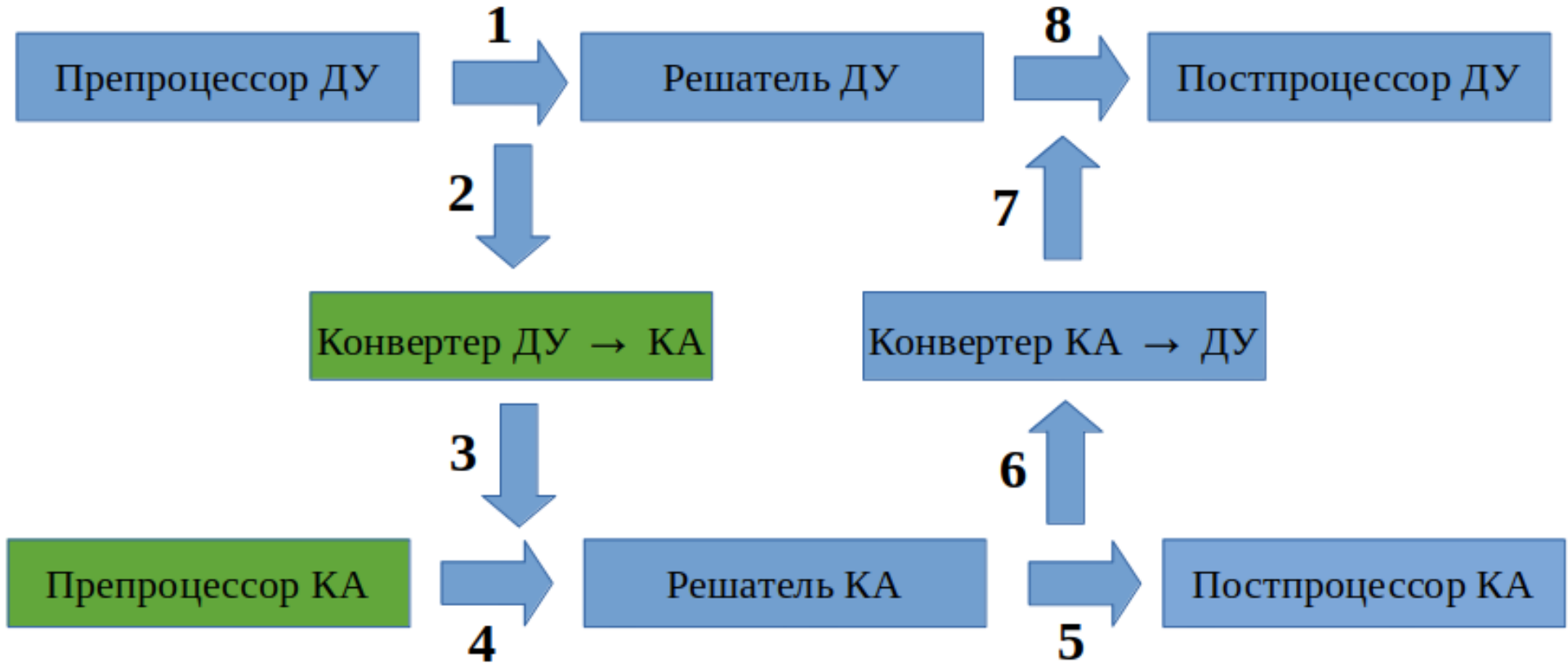
Цель:

разработка программной системы клеточно-автоматного моделирования газовых потоков с учётом интеграции расчётной модели из конечно-элементного представления пакета ЛОГОС Аэро-гидро.

Задачи.

1. Разработка и программная реализация алгоритма перевода начальных и граничных условий из растрового изображения в формат симулятора клеточно-автоматной модели FHP-MP.
2. Разработка и программная реализация алгоритма конвертации геометрии конечно-элементной модели в представление, используемое клеточно-автоматной моделью FHP-MP.
3. Тестирование программного комплекса на тестовых задачах.

Описание программной системы моделирования газовых потоков



Модель FHP-MP

Клеточным автоматом модели FHP-MP будем называть тройку объектов (W, A, N) , где

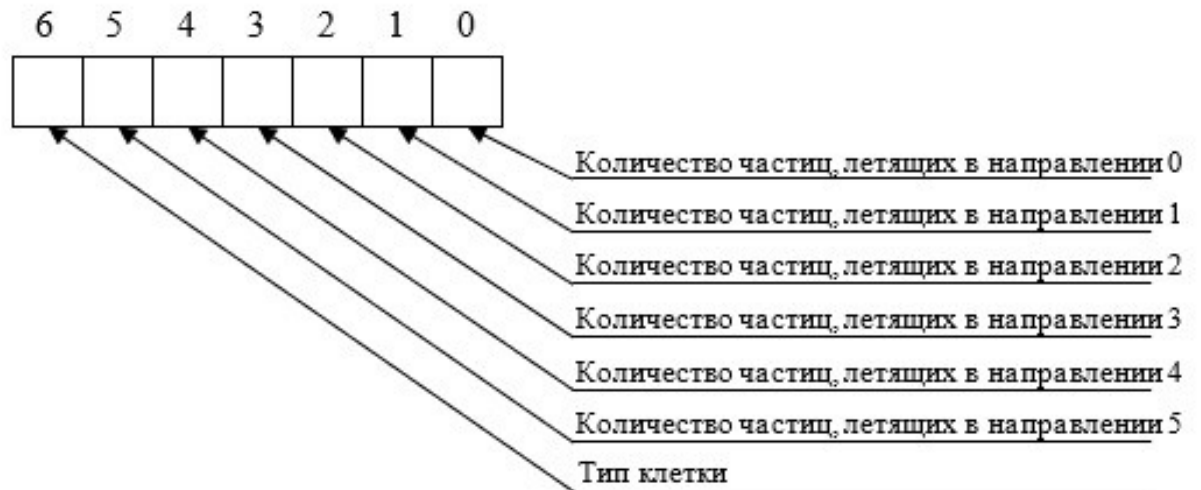
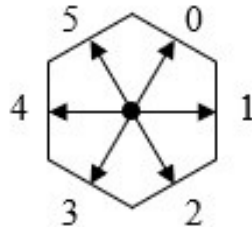
$W = \{w_1, w_2, \dots, w_i, \dots\}$ – множество клеток.

Каждой клетке $w \in W$ поставлен в соответствие конечный автомат A .

Для каждой клетки $w \in W$ определено некоторое упорядоченное множество $N(w) = \{N_i(w) : N_0(w) = w, N_i(w) \in W \ \& \ d(w, N_i(w)) = 1, (i = 1, 2, \dots, b)\}$, элементы которого находятся в отношении соседства с клеткой w и называются её соседними клетками, или соседями.

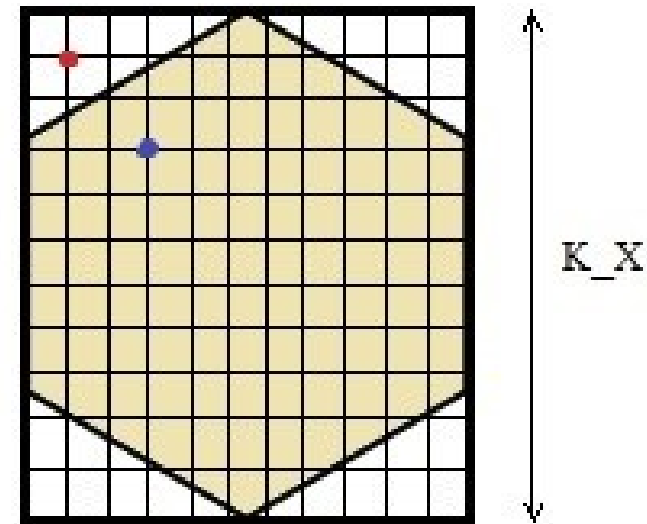
Типы клеток:

- среда;
- стенка;
- впускной клапан;
- выпускной клапан.



Алгоритм перевода растрового изображения в клеточный массив модели FHP-MP

1. Задаётся параметр K_L (масштаб расстояния).
2. На исходный растр накладывается гексагональная сетка и вокруг каждой клетки «описывается» прямоугольник.
3. Внутри области прямоугольника задаются узлы ортогональной сетки с шагом $K_x / 12$, где K_x – размер шестиугольной клетки.
4. Осуществляется обход по всем узлам ортогональной сетки каждого прямоугольника. Для каждого узла определяется его геометрическая принадлежность гексагональной клетке, вокруг которой описан этот прямоугольник.
5. Во время обхода прямоугольника определяется тип модельной клетки. Подсчитывается число внутренних для клетки узлов по их видам. Тип пикселя, в котором расположен узел, задаёт его принадлежность к определённому виду.
6. После обхода узлов прямоугольника шестиугольной модельной клетке присваивается тип наиболее распространённого вида узлов, попавших внутрь.



Модельная клетка с наложенной ортогональной сеткой

Алгоритм перевода конечно-элементной сетки в клеточный массив модели FHP-MP

Файл .ngeom

1. Блок, содержащий последовательность узлов сетки с их координатами (блок «узел — координаты»).

2. Блок, содержащий последовательность номеров элементов сетки, а так же количество узлов сетки, принадлежащих данному элементу. Помимо этого, каждому элементу сетки ставятся в соответствие номера узлов сетки, ему принадлежащих (блок «элемент — узел»).

3. Блок, содержащий последовательность номеров элементов сетки, а так же их тип (блок «элемент — тип»).

```
//-----  
1 -6.0000000000000000 -6.0000000000000000 +0.0000000000000000  
2 +1.0000000000000000 -6.0000000000000000 +0.0000000000000000  
3 +0.9999999999954881 +6.0000000000000000 +0.0000000000000000  
4 -6.0000000000000000 +6.0000000000000000 +0.0000000000000000  
...  
5964 +17.5298559672517700 +0.0019794938534883 +1.0000000000000000  
//-----  
1 4 9 12 363 239  
2 4 153 2143 3608 200  
3 4 239 363 3608 2143  
4 4 154 2144 3607 201  
...  
11622 4 595 19 20 626  
//-----  
...  
5761 11419 plane  
5762 11420 plane  
...  
5811 11469 in  
5812 11470 in  
...  
5899 11557 Wall-0-5  
5900 11558 Wall-0-5  
...  
5901 11559 out  
5902 11560 out  
...  
//-----
```

Алгоритм перевода конечно-элементной сетки в клеточный массив модели FHP-MP

Первый этап работы алгоритма конвертации

1. Считываем и сохраняем данные из блока «элемент — тип».
2. Для каждого элемента из считанных на предыдущем этапе находим соответствие из блока «элемент — узел».
3. Для каждого узла, считанного на предыдущем этапе, находим соответствующие координаты из блока «узел — координаты».

```
// _____  
1 -6.0000000000000000 -6.0000000000000000 +0.0000000000000000  
2 +1.0000000000000000 -6.0000000000000000 +0.0000000000000000  
3 +0.9999999999954881 +6.0000000000000000 +0.0000000000000000  
4 -6.0000000000000000 +6.0000000000000000 +0.0000000000000000  
...  
5964 +17.5298559672517700 +0.0019794938534883 +1.0000000000000000  
// _____  
1 4 9 12 363 239  
2 4 153 2143 3608 200  
3 4 239 363 3608 2143  
4 4 154 2144 3607 201  
...  
11622 4 595 19 20 626  
// _____  
...  
5761 11419 plane  
5762 11420 plane  
...  
5811 11469 in  
5812 11470 in  
...  
5899 11557 Wall-0-5  
5900 11558 Wall-0-5  
...  
5901 11559 out  
5902 11560 out  
...  
// _____
```

The diagram shows a vertical axis with three upward-pointing arrows. The bottom arrow is labeled '1', the middle arrow is labeled '2', and the top arrow is labeled '3'. These arrows point to the three main data blocks in the code: the first block of numerical values, the second block of element-to-node mappings, and the third block of node-to-coordinate mappings.

Алгоритм перевода конечно-элементной сетки в клеточный массив модели FHP-MP

Второй этап работы алгоритма конвертации

1. Нормируем систему координат.
2. Для каждого элемента формируется массив всех пар принадлежащих ему вершин. При этом, для каждой вершины отбрасывается координата z .
3. Для всех пар вершин элемента строится отрезок, соединяющий эти вершины.
4. Длина отрезка делится на размер модельной гексагональной клетки нацело: $countSteps = L / (K_x / 2)$. Здесь, $countSteps$ — целочисленное положительное число, L — длина отрезка, K_x — размер модельной клетки.
5. Если $countSteps$ равняется 0, то для концов отрезка определяется КА-клетка, которой он геометрически принадлежит. Этой точке присваивается тип равный типу элемента, которому принадлежит отрезок. Если $countSteps$ не нулевое, то оно инкрементируется. Разбиваем отрезок на $countSteps$ равных «подотрезков». Для каждой вершины «подотрезков» определяем модельную клетку и присваиваем ей тип элемента.

Тестирование

Задача 1. Внезапное расширение потока в газопроводе

Размер исходного растра: 514 на 232 пикселя.

Параметры КА-модели:

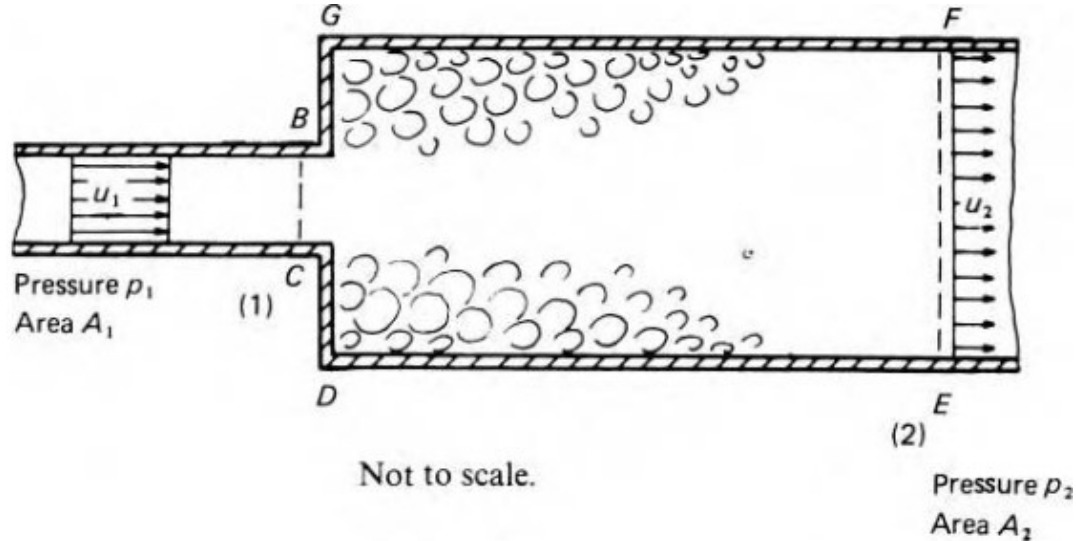
количество **генерируемых** частиц впускного клапана за одну итерацию — 10;

количество **поглощаемых** частиц выпускного клапана за одну итерацию — 3.

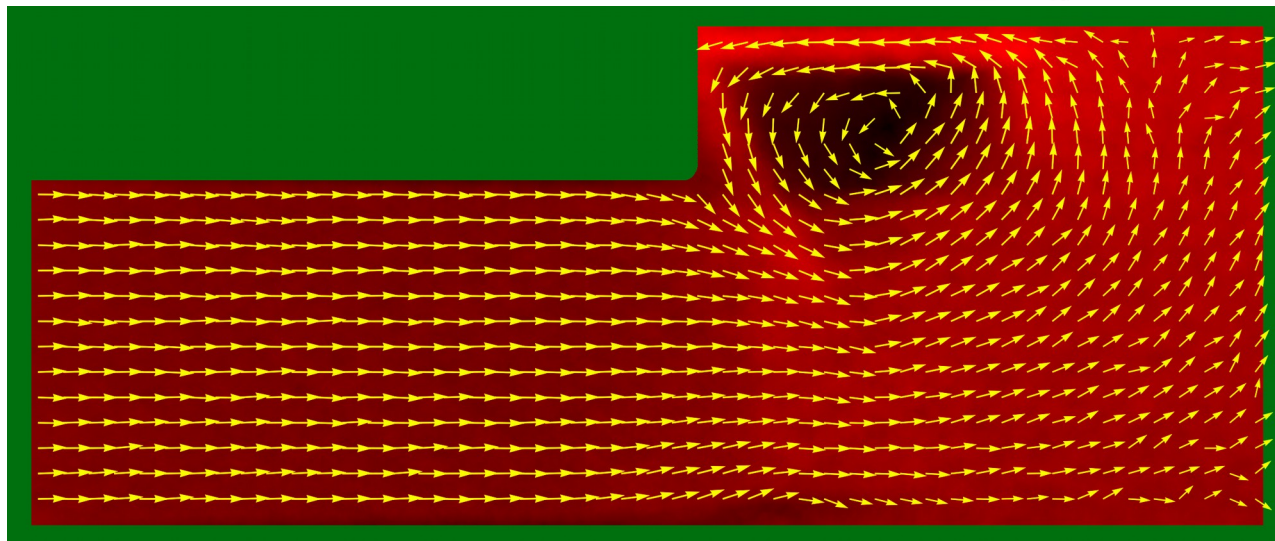
```
[imageParameters]
pathInputFile ../input.jpg
Kl 1.00
countTypes 16
countThreads 1
type0 192,255
type1 64,127
type2 128,191
type3 0,0
type4 0,0
type5 0,0
type6 0,0
type7 0,0
type8 0,0
type9 0,0
type10 0,0
type11 0,0
type12 0,0
type13 0,0
type14 0,0
type15 1,63
```

Конфигурационный
файл препроцессора

Внезапное расширение
газопровода
(взято из [1], рис. 7.8 на
стр. 261)



КА-область задачи
расширения потока в
газопроводе после 2000
расчётных итераций



Тестирование

Задача 2. Внезапное сужение потока в газопроводе

Размер исходного растра: 243 на 63 пикселя.

Параметры КА-модели:

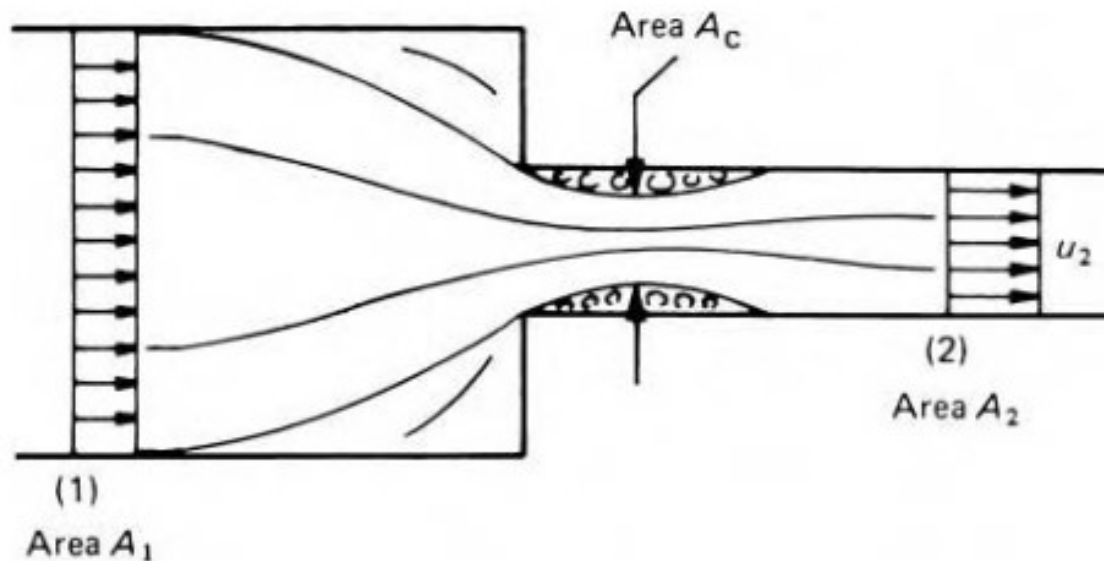
количество модельных клеток на один пиксель растра (**KI**) — 6;

количество **генерируемых** частиц впускного клапана за одну итерацию — 10;

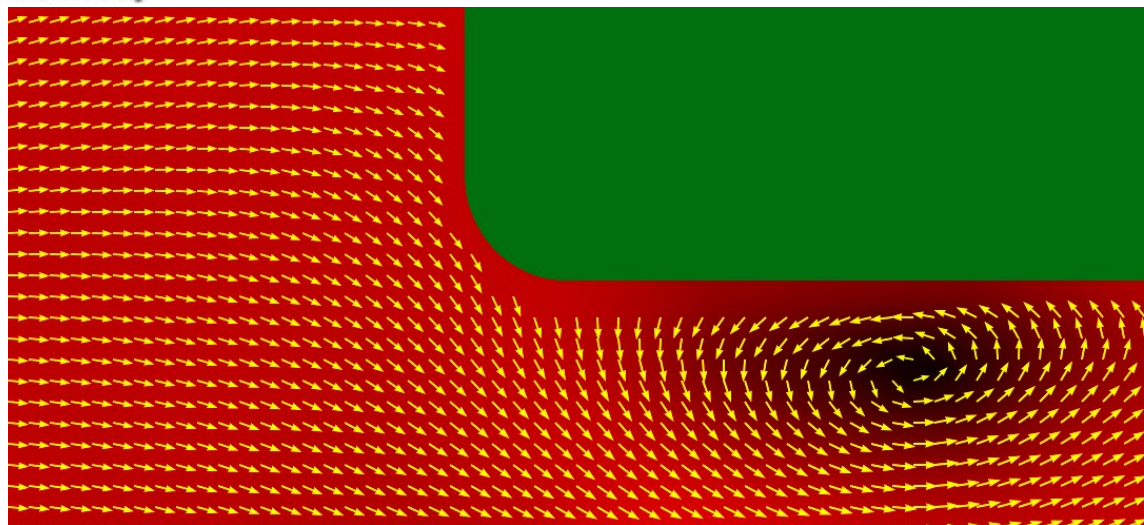
количество **поглощаемых** частиц выпускного клапана за одну итерацию — 3.

Размер клеточного массива расчётной области : 1459 на 438 модельных клеток.

Внезапное сужение газопровода (взято из [1], рис. 7.10 на стр. 263)

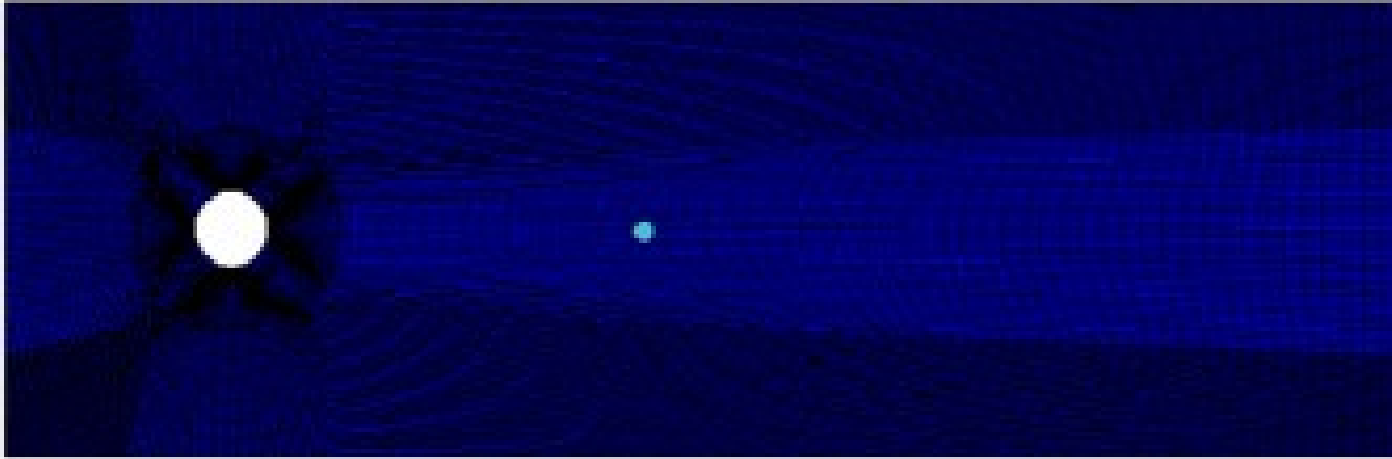


Вихрь задачи сужения потока в газопроводе после 8000 расчётных итераций

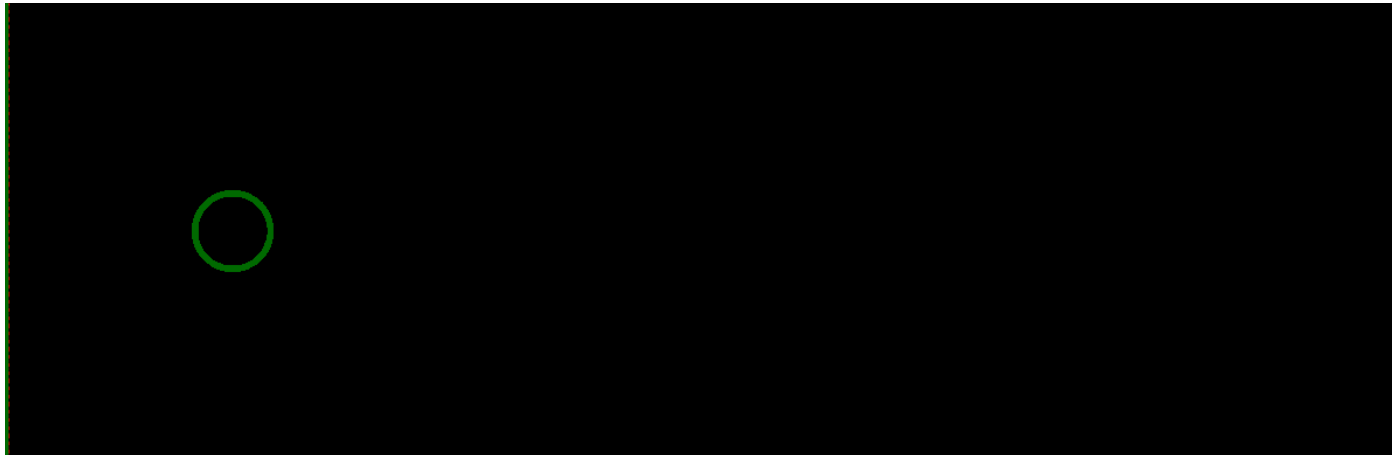


Тестирование

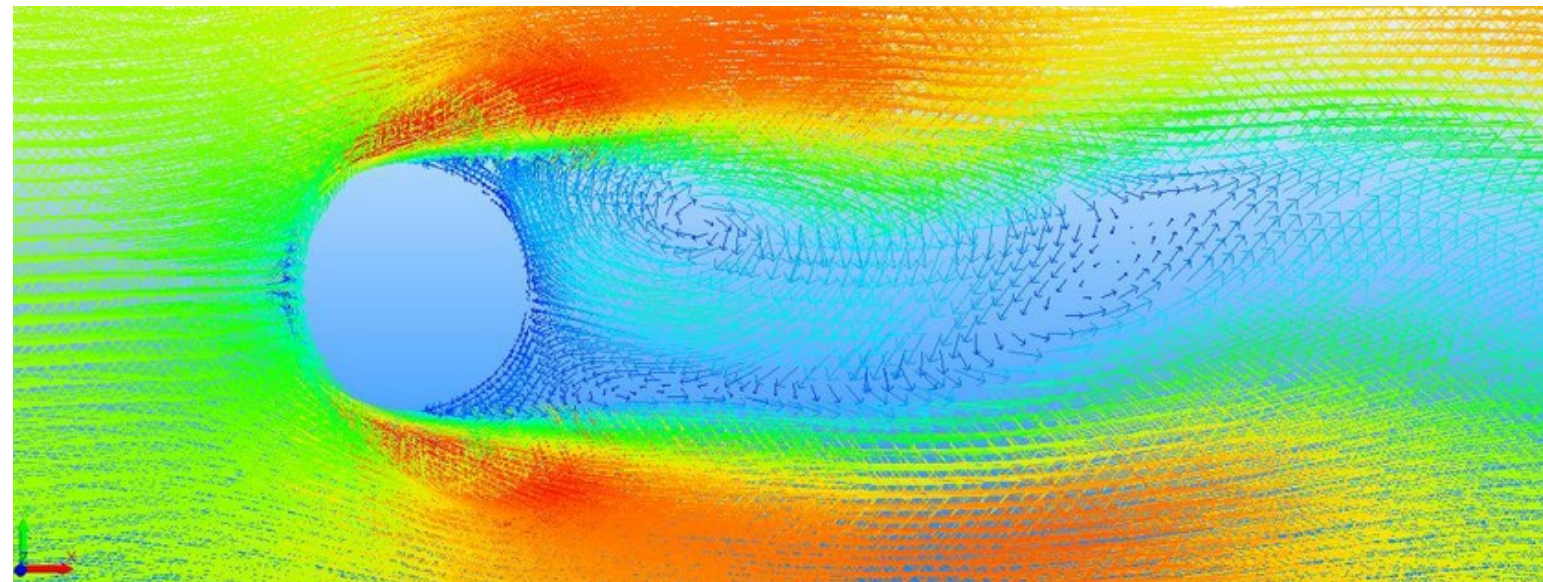
Задача 3. Обтекание кругового цилиндра



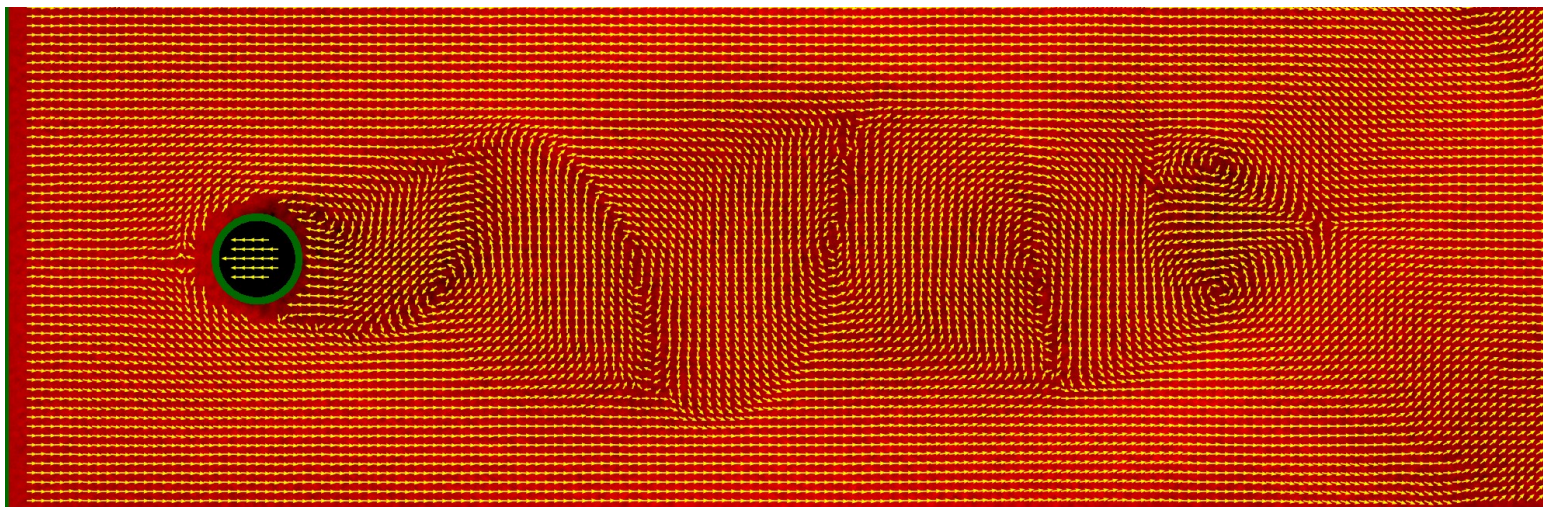
Геометрия расчётной области задачи обтекания кругового цилиндра в пакете ЛОГОС Аэро-Гидро



Геометрия расчётной области задачи обтекания кругового цилиндра в модели FHP-MP



Результат расчёта задачи
обтекания кругового
цилиндра в пакете ЛОГОС
Аэро-гидро



Результат расчёта задачи
обтекания кругового
цилиндра в модели FHP-MP
после 18000 итераций

Результаты

- Разработан алгоритм перевода растрового изображения в клеточный массив модели FHP-MP.
- Разработан алгоритм конвертации геометрии конечно-элементной модели пакета ЛОГОС Аэро-гидро в клеточный автомат FHP-MP.
- Алгоритмы были реализованы на языке C++ в виде отдельных программных модулей препроцессора и конвертера.
- Проведено тестирование разработанных модулей и системы моделирования в целом на нескольких базовых задачах газовой динамики.

Заключение

Результаты работы были представлены на конференции «Молодежные Марчуковские научные чтения 2023», г. Новосибирск, 2023 г. Тема доклада: «Архитектура препроцессора модели FHP-MP с использованием библиотеки CATlib».

Практическая ценность работы обусловлена тем, что полученные результаты могут быть использованы исследователями, ведущими свою научную деятельность в области газовой динамики.

Перспективность:

Одним из направлений развития является расширение функциональных возможностей конвертерного модуля. Планируется учитывать не только геометрию расчётной модели, но и часть её количественных характеристик (скорость, давление). Это позволит оценить не только качественное сходство или различие решений в клеточно-автоматной и конечно-элементной модели, но даст возможность провести соответствие между их количественными характеристиками.

Спасибо за внимание!