



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

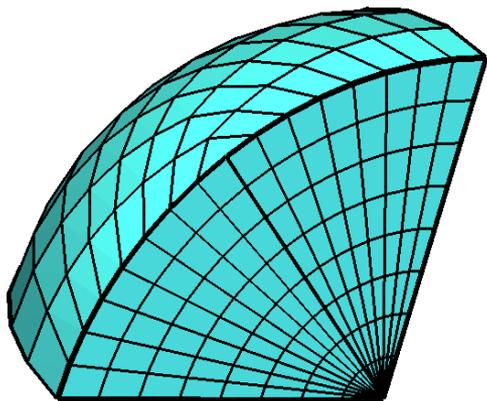
Использование сферических блочных сеток в расчетах газодинамических течений

Зарубин И.Н. Коротаев С.С. Пронин Я.В.

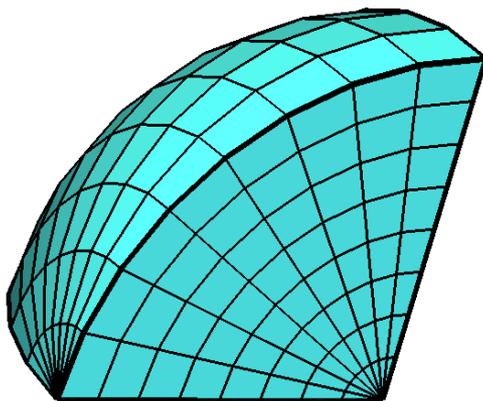
При численном решении уравнений газовой динамики на регулярных неподвижных эйлеровых сетках возникает вопрос о выборе вида расчетной сетки. В трехмерном случае наиболее однородной можно считать кубическую сетку в том смысле, что она является равномерной и ее сеточные линии ортогональны. Однако, для течений близких к сферическим, например, сжатие и разлет сферических оболочек, кубическая сетка может вносить возмущения за счет некорректного учета перетекания веществ через ребра и вершины ячеек из-за несогласованности линий сетки с течением. Существуют разные способы повышения точности расчетов на таких сетках, например, использование геометрической реконструкции контактных границ раздела веществ.

Одним из способов минимизации возмущений и повышения точности моделирования сферических газодинамических течений является применение сферических и квазисферических сеток.

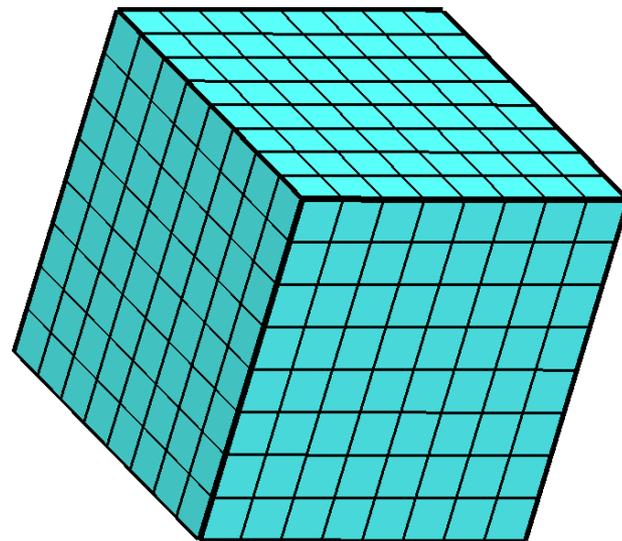
Типы используемых трехмерных сеток



Диагональная сетка.
Присутствуют треугольные
ячейки.



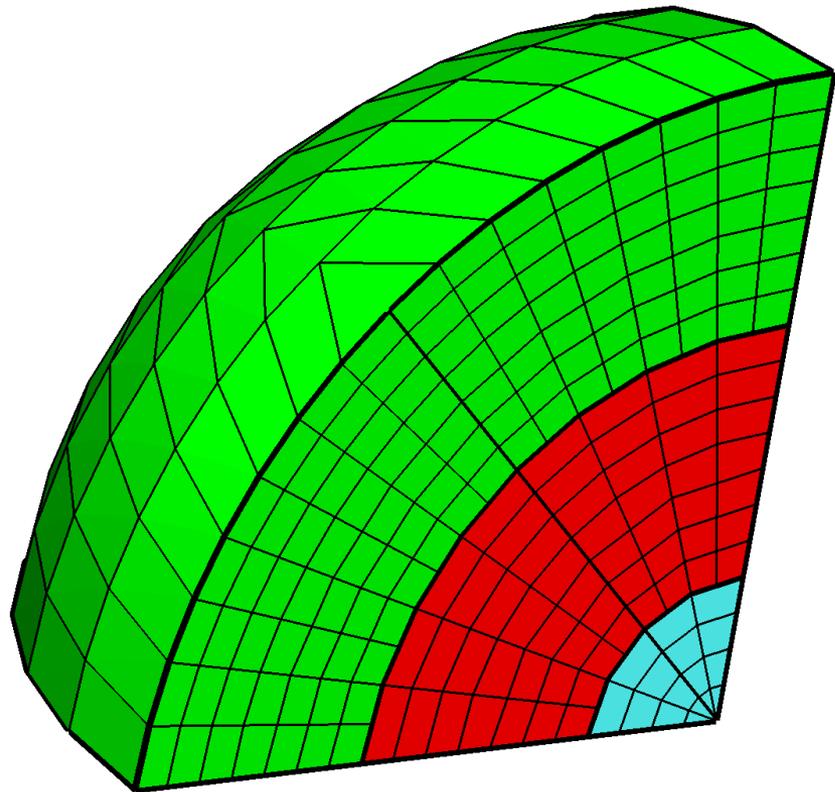
Сферическая сетка.
Присутствуют осевые ячейки.



Кубическая сетка.
Отсутствует радиальное
направление.

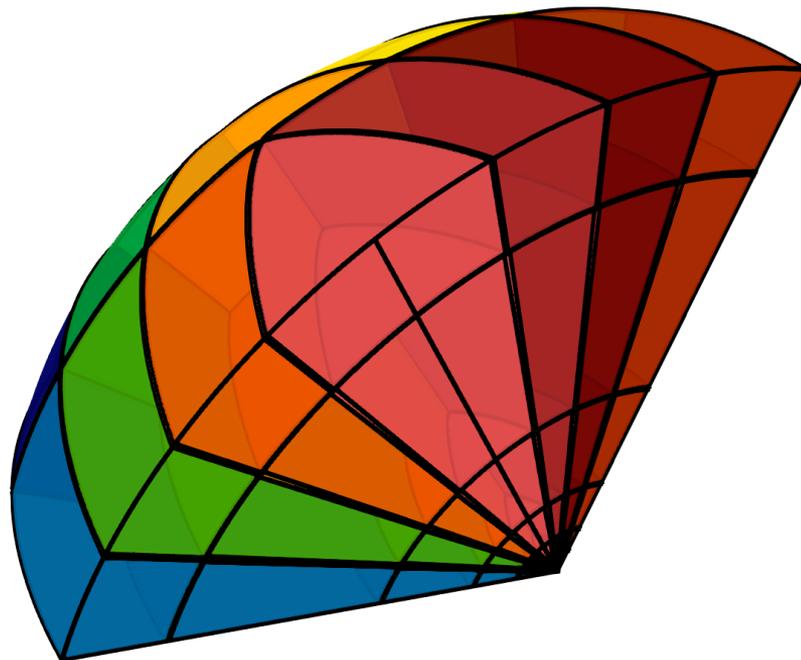
Блочные сетки

- Особенность квазисферических сеток - уменьшение углового размера ячеек при уменьшении радиуса сеточной поверхности.
- Для устранения этого эффекта может применяться сетка состоящая из блоков.
- В пересечении по радиальному направлению сетки согласованные, по угловому направлению – кратные.



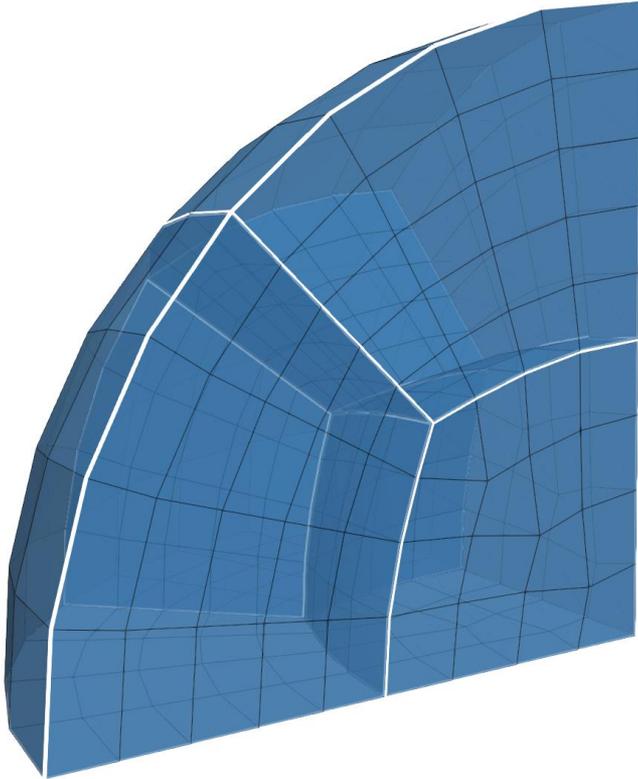
Пример многопроцессорной декомпозиции

- Диагональная сетка
- Границы сферических слоев выставляются в ручном или полуавтоматическом режиме
- Регулярное разбиение + стыковка с центральным фрагментом
- Декомпозиция только по угловым направлениям + центр
- Большой объем обменных данных
- Хорошая статическая балансировка



1/8 системы. Раскраска по номерам фрагментов. $(4 \times 4 + 1)$

Сетка особого вида



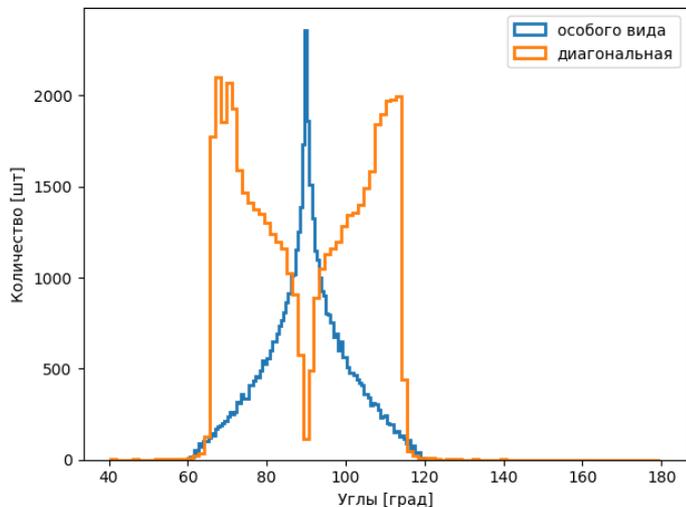
Пример сетки для 1/8 системы. Размер центральной части равен 4

Особенностью сетки является стыковка частей особым способом, когда узел одной части совпадает с узлом другой, при этом сеточные направления могут переходить одно в другое произвольным образом. Таким образом, для обеспечения работоспособности такой сетки, нужно особое ГУ.

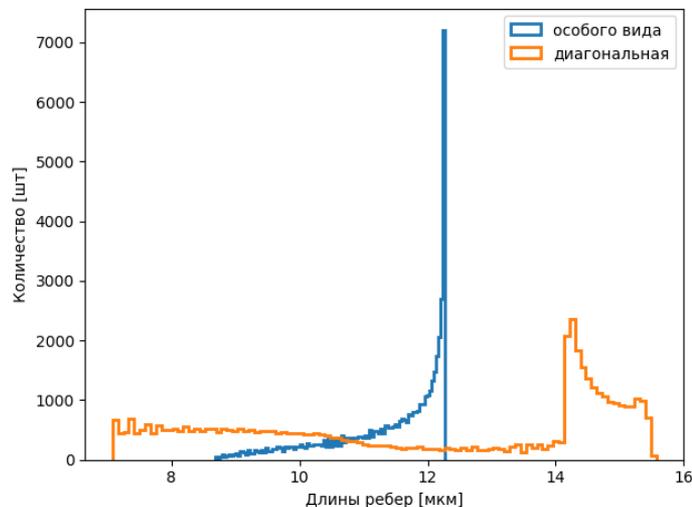
**Хорошая равномерность,
ортогональность и наличие
радиального направления.**

Сравнение сеток

В качестве теста использовалась **1/8 часть единичной сферы**. Диагональная сетка $111 \times 111 = 12\,321$ элемент на сфере. Сетка особого вида $64 \times 64 \times 3 = 12\,288$ элементов.



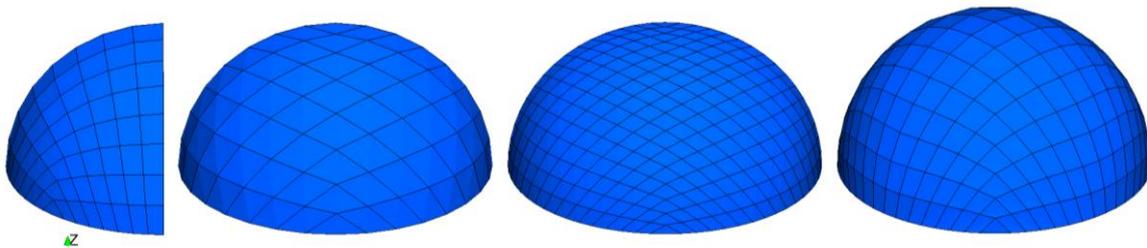
Гистограмма ортогональности.
Распределение углов в градусах.



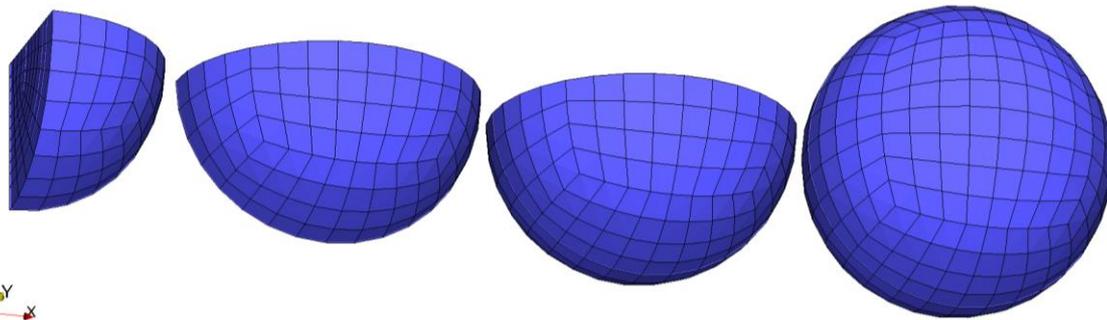
Гистограмма равномерности.
Распределение длин ребер.

Диагональная сетка существенно менее равномерная и менее ортогональная в сравнении с сеткой особого вида.

Масштабируемость сеток



Примеры диагональной сетки. $1/8$, $1/4$ и $1/2$ системы. Для любого числа интервалов невозможно представить $1/4$ системы как половину от $1/2$



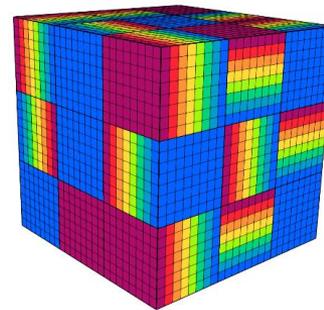
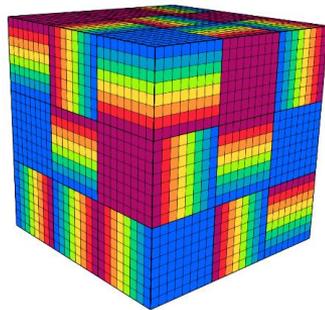
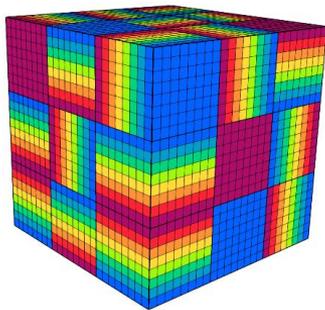
Примеры сетки. $1/8$, $2/8$, $4/8$, и $8/8$ системы. Каждый меньший фрагмент является частью большего.

Диагональная сетка не масштабируется на целую сферу и плохо масштабируется для $1/4$ системы.

Сетка особого вида обладает отличной масштабируемостью, может быть применена для моделирования целой системы.

Нерегулярная стыковка областей

- Для каждой области один слой фиктивных ячеек
- Взаимодействие областей через заполнение фиктивного слоя
- Карта соответствия для фиктивных ячеек и узлов в виде один к одному $(d_1, k_1, j_1, i_1) \leftrightarrow (d_2, k_2, j_2, i_2)$
- Карта соответствия для граничных узлов в виде один к нескольким $(d_1, k_1, j_1, i_1) \leftrightarrow \{(d_2, k_2, j_2, i_2), (d_3, k_3, j_3, i_3), \dots, (d_N, k_N, j_N, i_N)\}$
- Копирование только основных массивов
- Максимальное упрощение логики соседства, отсутствие карты направлений (какое сеточное направление одной области в какое переходит)



27 областей связанных ГУ «узел в узел» раскраска по сеточным индексам ячеек (l, j, k соответственно)

три обмены



Регулярная модель обменов:

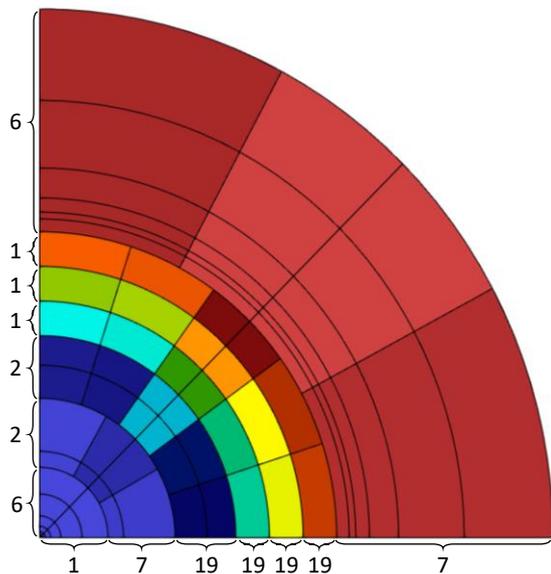
- 1) Сеточные направления соседних фрагментов согласованные
- 2) Существует глобальная регулярная индексация ячеек и узлов
- 3) Обмены осуществляются только через грань
- 4) Максимум 6 соседей
- 5) Все обмены проходят в одном порядке (k, j, i)
- 6) Отдельная логика для обмена центрального фрагмента с остальными при использовании сферических блоков
- 7) Информация на каждом фрагменте:
 - Для каждой грани номер фрагмента соседа f
- 8) Меньшее количество памяти под обменные структуры

Произвольная модель обменов:

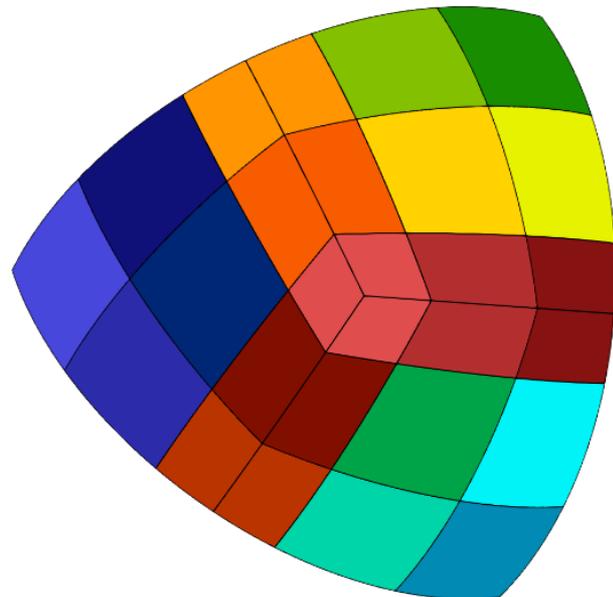
- 1) Сеточные направления соседних фрагментов произвольные
- 2) Глобальная регулярная индексация невозможна
- 3) Обмены осуществляются общими частями вне зависимости от того как они располагаются геометрически
- 4) Количество соседей не ограничено
- 5) Обмен данными это работа с массивом передаваемых величин вне зависимости от геометрических направлений
- 6) Каждый обмен для одного фрагмента – это просто обмен со всеми своими соседями, сколько бы их ни было
- 7) Информация на каждом фрагменте:
 - Список соседей f_1, f_2, \dots, f_N ,
 - Список ячеек (f, d, k, j, i) для отправки
 - Список ячеек (f, d, k, j, i) для приёма
 - Список узлов (f, d, k, j, i) для отправки
 - Список узлов (f, d, k, j, i) для приёма
 - Список граничных узлов (f, d, k, j, i) для осреднения
- 8) Больше количество памяти под обменные структуры

Пример декомпозиции

Номер слоя	Количество блоков	Количество фрагментов	Ячеек на фрагмент
1	6	1	1,412
2	2	7	1,399
3	2	19	1,417
4	1	19	1,310
5	1	19	1,310
6	1	19	1,310
7	6	7	1,310



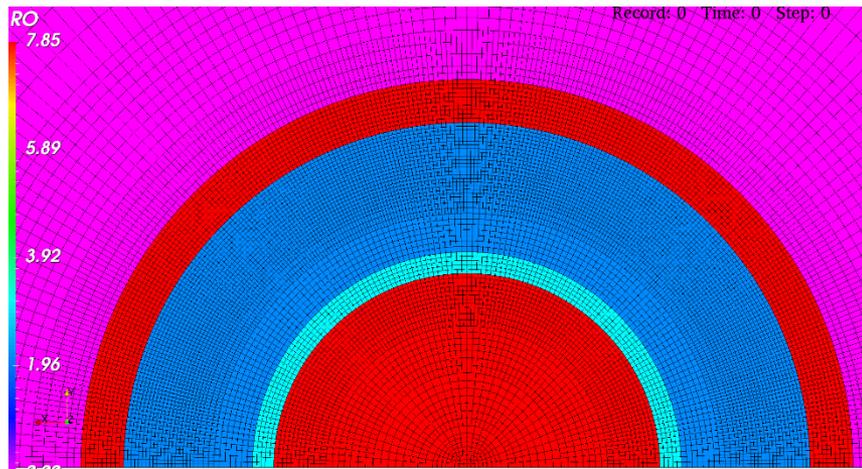
1/8 сферы.



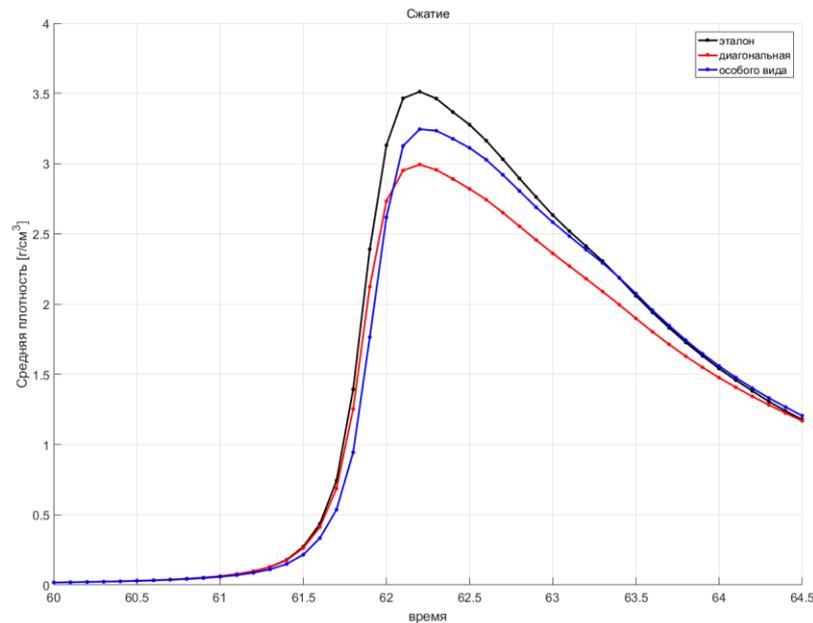
Слой номер 3.
Фрагменты с 8 по 26. Раскраска по номерам. Нумерация с нуля.



Пример расчета



Слоистая система.
Осевое инициирование.



Сжатие стального шара. Сравнение сеток

Выводы

Использование блочных сферических сеток особого вида при моделировании задач газовой динамики для сферических слоистых систем показывает хорошую симметрию и время счета в следствии хорошей равномерности и ортогональности сетки.

**Спасибо
за внимание**

05.2025

