

# **Инструментарий подготовки блочно-структурированной сетки для проведения расчетов методом RANS/ILES**

**Л.А. Бендерский<sup>1</sup>, Д.А. Любимов<sup>2</sup>, А.А. Рыбаков<sup>3</sup>**

*Межведомственный суперкомпьютерный центр РАН - филиал ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва, Россия,*

*E-mail's: <sup>1</sup>leosun.ben@gmail.com, <sup>2</sup>dalyubimov@ya.ru, <sup>3</sup>yvakov.aax@gmail.com*

**Аннотация:** Метод RANS/ILES с явным разрешением турбулентных вихрей успешно применяется для расчета нестационарных турбулентных течений. Применение данного метода требует большого количества вычислительных ресурсов, которое может обеспечить только суперкомпьютер. При использовании суперкомпьютера остро встает вопрос распараллеливания вычислений и их масштабирования на расчетные сетки, содержащие большое количество ячеек. В данной статье описываются подходы к подготовке блочно-структурированной расчетной сетки, позволяющие эффективно проводить вычисления на суперкомпьютере с использованием RANS/ILES метода.

**Ключевые слова:** RANS/ILES, суперкомпьютер, масштабирование, блочно-структурированная расчетная сетка, дробление расчетной сетки, распределение вычислительной нагрузки.

## **Введение**

Комбинированные RANS/ILES методы с явным разрешением турбулентных вихрей успешно применяются для расчетов силовых установок высокоскоростных летательных аппаратов [1]. Данные методы требуют применения разностных схем для конвективных членов уравнений Навье–Стокса, имеющих низкий уровень схемной вязкости. Обычно для вихреразрешающих методов используются схемы с высоким порядком аппроксимации параметров на гранях ячеек, что приводит к увеличению объема данных, передаваемых между вычислительными процессами. Также вихреразрешающие методы требуют использования сеток с существенно большим количеством ячеек, чем методы RANS для явного разрешения турбулентных вихрей. Кроме того, турбулентные течения нестационарны, и для их описания также необходимо решать численно нестационарные уравнения. При этом для явного разрешения вихрей шаг по времени должен быть мал, а время интегрирования должно быть достаточным для того, чтобы получить с требуемой точностью осредненные параметры течения и турбулентности. Из сказанного выше следует, что для эффективного численного

решения задач такого класса требуется применение суперкомпьютеров [2].

## **Описание RANS/ILES метода**

В комбинированном методе RANS/ILES около стенок для расчета течения решаются нестационарные уравнения Навье–Стокса с моделью турбулентности Спаларта–Аллмараса. Вдали от стенок течение описывается с помощью LES с неявной SGS-моделью – ILES. При таком подходе отсутствует явная SGS-модель турбулентности, а ее функцию выполняет схемная вязкость разностной схемы. Для расчета конвективных потоков на гранях расчетных ячеек используется схема Роу, предраспадные параметры для которой вычисляются с помощью схемы 9-го порядка MP9. Для реализации данной схемы необходимо знать значения параметров течения из 5 соседних ячеек с каждой стороны рассматриваемой грани. Диффузионные потоки на гранях ячеек определяются с помощью аппроксимации с центральными разностями со вторым порядком. Интегрирование по времени выполняется с помощью технологии интегрирования по двойному времени. Интегрирование по физическому времени выполняется со вторым порядком точности.

В области около стенок, где течение описывается с помощью RANS, конвективные потоки на гранях расчетных ячеек в разностном аналоге уравнения для модели турбулентности вычисляется с помощью схемы WENO5. В области ILES модель турбулентности Спаларта–Аллмараса изменяется таким образом, чтобы турбулентная вязкость равнялась нулю [3].

Вычисления методом RANS/ILES проводятся на блочно-структурной сетке. RANS/ILES метод показал свою состоятельность при расчетах высокоскоростных турбулентных течений на суперкомпьютере и продемонстрировал близкую к линейной масштабируемость, а на количестве вычислительных узлов до 20 – даже сверхлинейную масштабируемость [4].

## **Внутреннее представление блочно-структурной сетки**

Блочно-структурные расчетные сетки более предпочтительны для проведения вычислений, чем неструктурные, так как состоят из отдельных блоков, ячейки в каждом из которых упорядочены в памяти. Это позволяет быстрее производить вычисления и снижает требования к объему памяти. Однако построение блочно-структурных сеток значительно затруднено по сравнению с неструктурными [5]. Построение же блочно-структурных расчетных сеток вручную приводит к неоптимальному распределению вычислительной нагрузки при проведении расчетов, так как зачастую такие сетки содержат блоки с большим количеством ячеек.

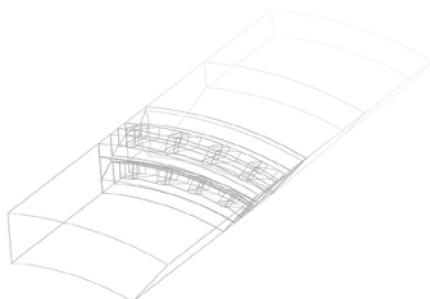


Рис. 1. Пример расчетной сетки с выраженным крупными блоками.

Для повышения эффективности использования блочно-структурных сеток при проведения расчетов RANS/ILES методом было разработано внутреннее представление сетки [6] и программный комплекс для подготовки сетки к вычислениям.

Основным объектом блочно-структурированной расчетной сетки является блок (Block), содержащий трехмерный массив ячеек. В блоке хранится информация о газодинамических параметрах всех ячеек, а также координаты всех вершин ячеек. Каждый блок обладает собственной системой координат ( $I$ ,  $J$ ,  $K$ ). Отдельные блоки расчетной сетки могут соприкасаться друг с другом, касание двух блоков по ненулевой площади описывается парой интерфейсов (Interface). Кроме координат касания граней блоков пара интерфейсов также устанавливает взаимное соответствие систем координат касающихся блоков. На границе блока кроме другого блока может находиться также граница расчетной области, в этом случае на данной границе можно задать граничное условие (Boundary Condition).

На рис. 1 представлена блочно-структурированная расчетная сетка, представляющая 36-градусный сектор элемента силовой установки высокоскоростного летательного аппарата, состоящая из 30 блоков, 152 интерфейсов и 204 граничных условий.

## **Измельчение крупных блоков расчетной сетки**

В блочно-структурной сетке все объекты обладают каркасом, который представляет собой двумерный или трехмерный массив узлов. Данный каркас может быть разрезан вдоль любого направления ( $I$ ,  $J$  или  $K$ ) по линии между соседними ячейками сетки. Таким образом любой объект расчетной сетки может быть разрезан по любому направлению. Дробление блока сетки является важнейшим действием, позволяющим обеспечить равномерное распределение блоков сетки между обрабатывающими параллельными процессами. Наиболее простой стратегией дробления сетки является дробление наиболее крупных блоков сетки на две

равные части [7]. После выполнения очередного разреза наиболее крупного блока по наиболее протяженному направлению выполняется попытка равномерно распределить получившиеся блоки между вычислительными процессами. При этом показателем качества распределения является отклонение наиболее загруженного процесса от среднего – значение, на которое отличается максимальное количество ячеек, обрабатываемое одним процессом, от среднего значения по всем процессам.

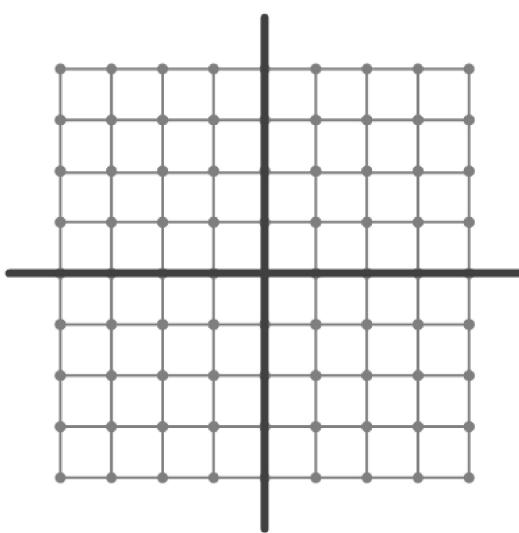


Рис. 2. Возможные варианты разреза при делении крупного блока на две равные части.

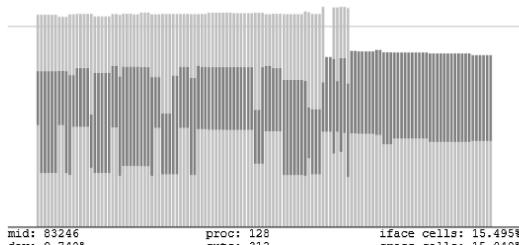


Рис. 3. Деление крупных блоков для распределения сетки на 128 процессов (312 разрезов при отклонении 9.74%).

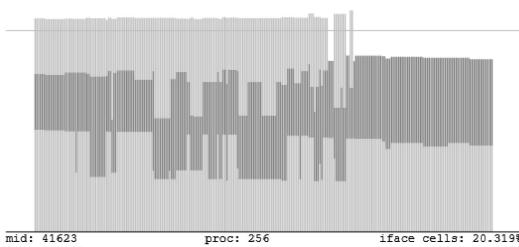
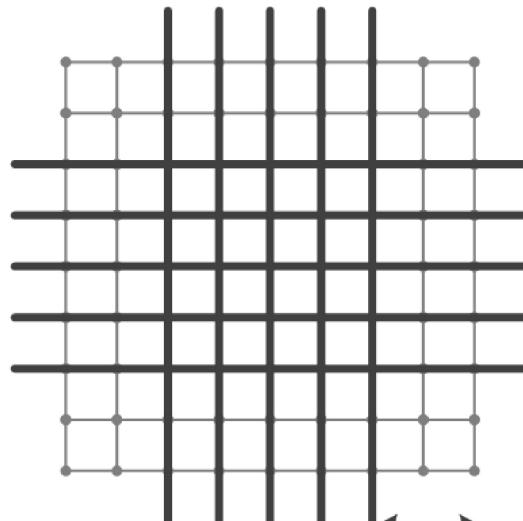


Рис. 4. Деление крупных блоков для распределения сетки на 256 процессов (655 разрезов при отклонении 9.99%).

## Минимизация количества разрезов расчетной сетки

Дробление расчетной сетки путем разрезания наиболее крупных блоков выполняется достаточно быстро, однако такой подход обладает рядом недостатков. Зачастую данный метод требует выполнения большого количества разрезов (несмотря на то, что производятся они достаточно быстро), что приводит к возрастанию объема данных (и увеличению самого количества сообщений), пересылаемых между вычислительными процессами во время проведения расчетов.

Поэтому был предложен другой подход, во время которого на каждом шаге дробления блоков рассматривается все доступное множество разрезов всех блоков (см. рис. 5) и из этого множества выбирается наиболее оптимальный по некоторому набору эвристик. Данный метод подробно описан в [4].



Минимальный отступ  
Рис. 5. Возможные варианты разреза при минимизации количества дроблений.

На рисунках 6 и 7 представлены распределения блоков расчетной сетки на 128 и 256 процессов методом минимизации количества разрезов для рассматриваемой в данной статье тестовой сетки. Применение данного метода демонстрирует примерно двукратное сокращение количества разрезов по сравнению с обычным методом последовательных разрезов крупных блоков.

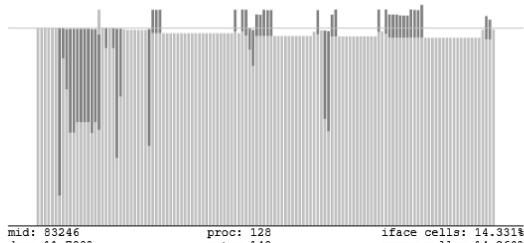


Рис. 6. Минимизация количества дроблений для распределения сетки на 128 процессов (148 разрезов при отклонении 11.798%).

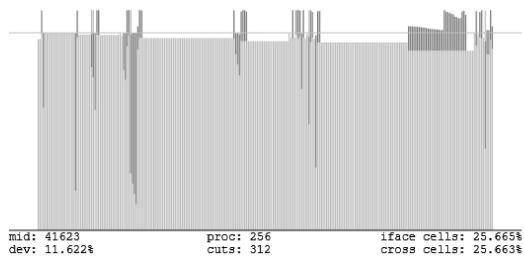


Рис. 7. Минимизация количества дроблений для распределения сетки на 256 процессов (312 разрезов при отклонении 11.622%).

## Реализация связанных граничных условий

При расчете газодинамических процессов внутри осесимметричной области целесообразно производить прямой расчет лишь части области, а результаты в дополнительной области устанавливать в соответствии с симметрией. На рис. 8 представлена расчетная осесимметричная сетка, состоящая из десяти одинаковых 36-градусных сегментов (расчетная сетка, соответствующая одному сегменту, представлена на рис. 1).

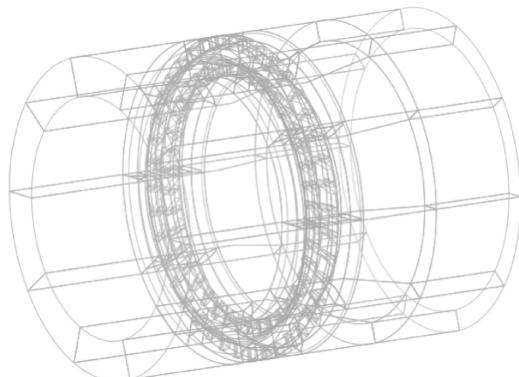


Рис. 8. Дополнение сетки с рис. 1 до 360-градусного объекта с помощью использования связанных граничных условий.

Для того, чтобы было возможно проводить расчет только внутри одного 36-градусного сегмента, необходимо поддерживать синхронное изменение данных на границах сегмента с его симметричными соседями. Это приводит к тому, что появляются так называемые связанные граничные условия – граничные условия, заданные сразу на паре пространственно разнесенных граней блока. Данная пара граничных условий имеет одинаковые размеры и при дробление одного граничного условия из этой пары приводит к автоматическому дроблению его отражения (Mirror BCond).

В программном комплексе реализован механизм связанных граничных условий с автоматическим поиском этих условий. Поиск связанных граничных условий определяется типом движения, с помощью которого связанные граничные условия совмещаются друг с другом (реализованы два типа движения – параллельный перенос и поворот вокруг заданной оси вращения).

Реализованный механизм позволяет для сетки, изображенной на рис. 8 производить прямой расчет только одного сектора, что ускоряет расчеты ровно в 10 раз на рассматриваемой тестовой сетке.

## Заключение

В статье рассмотрены важные инструменты подготовки блочно-структурированной расчетной сетки к проведению высокопараллельных расчетов RANS/ILES методом на суперкомпьютере. Рассмотрены два метода распределения блоков расчетной сетки по вычислительным процессам, позволяющие распределить вычислительную нагрузку на 128, 256 и более процессов с отклонением, не превышающим 10% от среднего значения. Рассмотрен механизм использования связанных граничных условий, позволяющий ускорить в разы вычисления, проводимые на осесимметричных расчетных сетках.

Работа выполнена в рамках проекта «Исследование с использованием суперкомпьютера физических особенностей нестационарных турбулентных течений и

газодинамического управления этими течениями в элементах силовой установки гиперзвукового летательного аппарата» по программе фундаментальных исследований президиума РАН «Фундаментальные основы

прорывных технологий в интересах национальной безопасности». В работе использовался суперкомпьютер МВС-10П, находящийся в МСЦ РАН.

## The toolkit for preparing a block-structured grid for RANS/ILES calculations

**L.A. Benderskiy, D.A. Lyubimov, A.A. Rybakov**

**Abstract:** The RANS/ILES method with an explicit resolution of turbulent vortices is successfully used to calculate nonstationary turbulent flows. The application of this method requires a large amount of computing resources, which can be provided only by a supercomputer. When using a supercomputer, the problem of parallelizing computations and their scaling to computational grids containing a large number of cells is acute. This article describes approaches to the preparation of a block-structured computational grid, which allow efficient calculation on a supercomputer using the RANS/ILES method.

**Keywords:** RANS/ILES, supercomputer, scaling, block-structured grid, cutting of calculated grid, computational load distribution.

### Литература

1. Д.А. Любимов, И.В. Потехина. Исследование нестационарных режимов работы сверхзвукового воздухозаборника RANS/ILES-методом. ТВТ. 2016. Т. 54. № 5. С. 784–791.
2. О.С. Аладышев, Е.А. Киселев, Г.И. Савин, П.Н. Телегин, Б.М. Шабанов. Влияние характеристик внешней памяти суперкомпьютерных комплексов на выполнение параллельных программ. Системы и средства информатики. 2014. Т. 24. № 4. С. 111-123.
3. Д. А. Любимов. Разработка и применение метода высокого разрешения для расчета струйных течений методом моделирования крупных вихрей. ТВТ. 2012. Т. 50. № 3. С. 450-466.
4. Л.А. Бендерский, Д.А. Любимов, А.А. Рыбаков. Анализ эффективности масштабирования при расчетах высокоскоростных турбулентных течений на суперкомпьютере RANS/ILES методом высокого разрешения. Труды НИИСИ РАН. Т. 7. № 4. 2017. С. 32-40.
5. V. Liseikin. Grid generation methods. Springer. 2010.
6. А.А. Рыбаков. Внутреннее представление и механизм межпроцессного обмена для блочно-структурированной сетки при выполнении расчетов на суперкомпьютере. Программные системы: Теория и приложения. № 1 (32). 2017. С. 121-134.
7. А.А. Рыбаков. Распределение вычислительной нагрузки между узлами суперкомпьютерного кластера при расчетах задач газовой динамики с дроблением расчетной сетки. Международный научный журнал «Современные информационные технологии и ИТ-образование». Т. 12. № 2. 2016. С. 101-107.