

Анализ эффективности масштабирования при расчетах высокоскоростных турбулентных течений на суперкомпьютере RANS/ILES методом высокого разрешения

Л.А. Бендерский, Д.А. Любимов, А.А. Рыбаков

ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Межведомственный суперкомпьютерный центр, Москва, Россия,

E-mail: antbar@mail.ru

Аннотация: В статье рассматривается актуальная задача расчета характеристик нестационарного турбулентного течения внутри воздухозаборника высокоскоростного летательного аппарата. Подобные расчеты ввиду своей требовательности к вычислительным ресурсам выполняются на суперкомпьютере. При использовании суперкомпьютерного вычислительного кластера, содержащего большое количество узлов, возникает проблема эффективного масштабирования выполняемых запусков. В статье описан алгоритм распределения вычислительной нагрузки между узлами суперкомпьютера с применением измельчения блочно-структурированной расчетной сетки и приведены результаты по масштабированию расчетов на суперкомпьютере МСЦ РАН.

Ключевые слова: турбулентность, высокоскоростное воздухозаборное устройство, вихреразрешающие методы, численные методы, RANS/ILES, суперкомпьютер, масштабирование, распределение вычислительной нагрузки.

Введение

Возросший интерес к гиперзвуковым летательным аппаратам (ГПЛА) стимулирует исследование обтекания как аппаратов целиком, так и течений в отдельных их элементах. Для ГПЛА с воздушно-реактивным двигателем обязательным условием является надежная работа воздухозаборного устройства (ВЗУ), что обеспечивает надежную работу силовой установки в целом. Для этого необходимо, чтобы течение на выходе из ВЗУ было близким к стационарному, а потери полного давления на торможение в скачках уплотнения – минимальны. Кроме того, практически важным является определение границ устойчивой работы ВЗУ: границы начала срыва потока, который может наступать при изменении режима работы двигателя или условий полета.

Применение экспериментальных методов [1, 2] ограничено в силу их высокой стоимости и сложности создания реальных условий полета в аэродинамических трубах. Это стимулирует использование численного моделирования течений в гиперзвуковых ВЗУ. Наиболее распространенным является

применение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS) с моделями турбулентности.

В тех случаях, когда наблюдаются нестационарные явления, использование методов RANS не столь успешно, особенно в случаях, когда нестационарные явления обусловлены турбулентными эффектами, такими, как отрыв пограничного слоя при взаимодействии скачка уплотнения, отрывные течения в диффузорах, а также срыв и незапуск ВЗУ. В этом случае следует использовать методы, в которых турбулентные вихри разрешаются явным образом: DNS, LES или комбинированные RANS/LES. Последние уже успешно применяются для расчетов ВЗУ [3].

Применение вихреразрешающих методов требует применения разностных схем для конвективных членов уравнений Навье-Стокса, имеющих низкий уровень схемной вязкости. Как правило, для вихреразрешающих методов используются схемы с высоким порядком аппроксимации параметров на гранях ячеек (выше третьего), что приводит к увеличению объема передаваемых данных между вычислительными процессами.

Кроме того, вихреразрешающие методы требуют использования сеток с существенно большим количеством ячеек, чем методы RANS для явного разрешения турбулентных вихрей.

Следует также помнить, что турбулентные течения нестационарны, и для их описания также необходимо решать численно нестационарные уравнения.

При этом шаг по времени должен быть достаточно мал, чтобы описать движение всех разрешенных явным образом турбулентных вихрей, а время интегрирования 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. Использование суперкомпьютеров в расчетах подразумевает запуск задачи сразу в большом количестве параллельных процессов, которые обмениваются между собой данными [4].

При возрастании количества процессов возникают дополнительные требования к характеристикам расчетных сеток в плане равномерности распределения вычислительной нагрузки между процессами. Для того, чтобы выполнить эти требования нужно перестраивать расчетную сетку в автоматическом режиме.

Механизмы равномерного распределения вычислительной нагрузки между процессами суперкомпьютера являются важной частью подготовки к вычислениям.

К ним относится измельчение блоков сетки и распределение результирующих блоков между различными процессами.

Целью настоящей работы является анализ эффективности масштабирования при расчетах турбулентных течений в высокоскоростных ВЗУ на суперкомпьютере RANS/ILES методом высокого разрешения при использовании разработанных алгоритмов подготовки расчетной сетки.

Описание RANS/ILES метода

Уравнения Навье–Стокса, описывающие течения сжимаемого газа, и уравнение переноса записаны в консервативной форме

для криволинейной системы координат, сеточные линии которой совпадали с границами расчетной области и поверхностью исследуемого тела. Для их решения был использован комбинированный RANS/ILES-метод [5].

Около стенок для расчета течения решались нестационарные уравнения Навье–Стокса с моделью турбулентности Спаларта–Аллмараса. Вдали от стенок течение описывалось 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 была использована схема Роя, предраспредные параметры для которой вычислялись с помощью сохраняющей монотонность противопоточной 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 определялись с помощью аппроксимации с центральными разностями со вторым порядком.

Интегрирование по времени выполнялось с помощью технологии «dual time stepping» – интегрирование по двойному времени. При таком подходе на каждом шаге по времени решение находится с помощью неявного метода установления по параметру, «искусственному времени».

Интегрирование по физическому времени выполнялось 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 вычислялись с помощью схемы WENO5. В области ILES модель турбулентности Спаларта–Аллмараса изменяется таким образом, чтобы турбулентная вязкость равнялась нулю [5].

Данный метод успешно применялся для расчета сверхзвуковых течений в ВЗУ ранее [3].

Постановка задачи газовой динамики

В качестве тестовой задачи было выбрано модельное ВЗУ (ВЗ) [2] высокоскоростного летательного аппарата. Его геометрия представлена на Рис. 1, ВЗУ с прямоугольным поперечным сечением шириной 54 мм с боковыми щеками, идущими от передней кромки. Торможение потока осуществлялось в двух скачках уплотнения, которые формировались изломами на нижней поверхности торможения ВЗУ.

Режимные параметры потока соответствовали числу Маха 5.9. Полное давление и температура перед ВЗУ 1.27 МПа и 810 К. Статическое давление, соответствующее режимным параметрам, (P_{inf}) равно 891 Па. Число Рейнольдса, вычисленное по единице длины равно $5.2 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$.

В расчете число Рейнольдса, вычисленное по высоте входа в ВЗ, к которой были отнесены линейные размеры, составляло 3.12×10^5 .

Эти параметры соответствовали условиям эксперимента [2]. На выходе из канала ВЗУ устанавливались разные по высоте вставки, моделирующие разную степень дросселирования. Степень дросселирования вычислялась по формуле:

$$TR = 1 - \frac{A_{t,plug}}{A_{isolator}}$$

где $A_{t,plug}$ – площадь горла образованного вставкой, $A_{isolator}$ – площадь проходной части изолятора ВЗ. Значение параметра TR , равное 0, соответствует отсутствию вставки в канале ВЗ

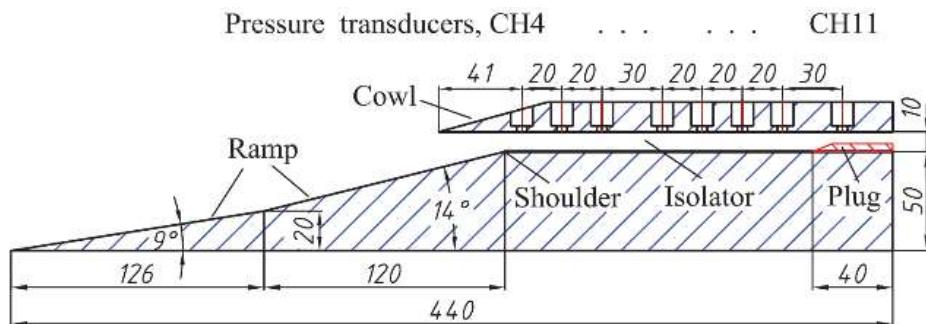


Рис. 1. Геометрия модельного ВЗУ из работы [2].

Были использованы следующие граничные условия. На входной сверхзвуковой границе, через которую поток втекает в расчетную область, фиксировались значения всех параметров течения, на выходе из ВЗУ было задано постоянное давление 50 КПа, что соответствовало условиям эксперимента [2].

На внешней выходной границе задавалось граничное условие сверхзвукового выхода, значения всех параметров сносились изнутри расчетной области. На твердых стенках использовалось комбинированное граничное прилипание «закон стенки». Тип условия выбирался в зависимости от значения Y^+ в центре ближайшей к стенке ячейки. Расчетная геометрия воздухозаборного устройства и фрагмент расчетной сетки показан на Рис 2.

Ниже представлены результаты расчета для расчетной сетки, состоящей из 4.13×10^6 ячеек. На Рис. 3 показано сравнение поля течения в расчете и в эксперименте для режима $TR = 0$. Видно, что течение в расчете и в эксперименте имеет схожую структуру. Количественное сравнение по

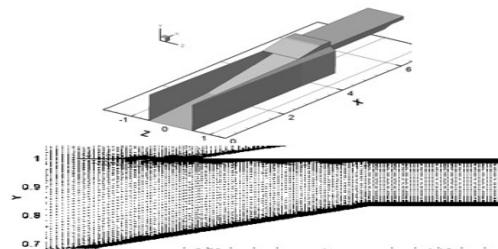


Рис. 2. Расчетная геометрия ВЗУ и фрагмент расчетной сетки.

распределению давления на верхней стенке ВЗУ (Рис. 4), также показывает хорошее соответствие результатов расчета с экспериментом.

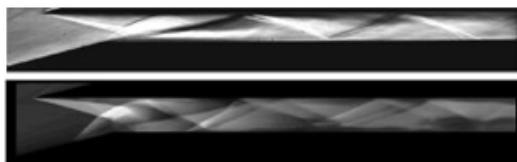


Рис. 3. Сверху поле градиента плотности (эксперимент [2]), снизу поле плотности расчет. Режим $TR=0$.

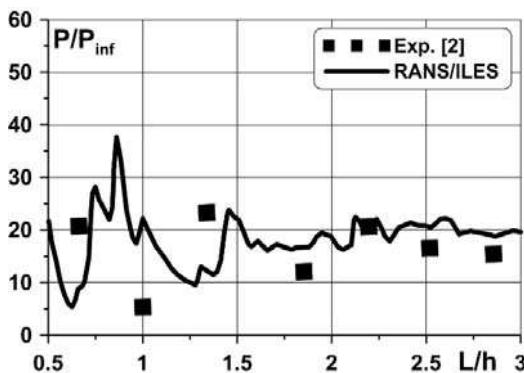


Рис. 4 Распределение давления на верхней стенке ВЗУ ($TR = 0$).

Возможность описания настоящим методом потери устойчивости течения в ВЗУ при увеличении дросселирования показана на Рис5, где представлены полученные в эксперименте [2] и при расчетах настоящим методом зависимости частоты помпажа от степени дросселирования ВЗУ.

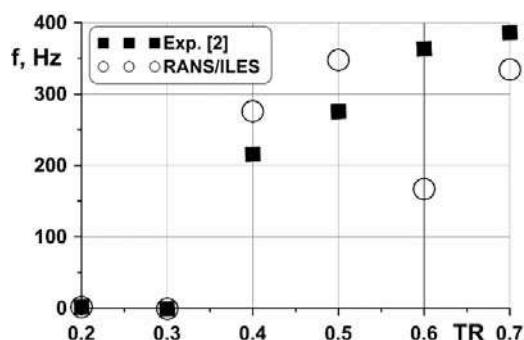


Рис. 5. Зависимость от степени дросселирования частоты помпажных колебаний.

В расчете частота помпажа определялась на основе обработки осциллограмм давления для значений TR от 0 до 0.7. Видно, что для всех исследованных случаев кроме $TR = 0.6$ частота колебаний, полученная в расчетах, хорошо совпадает с

данными эксперимента [2]. Причем помпажные колебания течения в ВЗУ в эксперименте и в расчете начинаются при одинаковом TR , что очень важно для практических приложений.

Полученные результаты говорят о возможности использования данного метода для расчетов характеристик течения, определения границ устойчивой работы ВЗУ для ГПЛА.

Представление расчетной сетки

В данной работе в расчетах используется блочно-структурная сетка [6], основным объектом которой является блок. Блок состоит из упорядоченного трехмерного массива ячеек, содержащих газодинамические параметры, ассоциированные с центрами масс ячеек. Упорядоченность размещения ячеек позволяет быстрее производить вычисления и снижает требования к объему оперативной памяти, однако строить блочно-структурные сетки гораздо сложнее, чем неструктурные. С каждым блоком сетки ассоциирована криволинейная система координат, которая задается тремя линиями координат в пространстве индексов (I, J, K) , каждая из которых связывает пары противоположных граней блока.

Объектом, описывающим соприкосновение двух соседних блоков, является интерфейс. Интерфейс является односторонним, он сообщает, что у данного блока конкретная прямоугольная часть границы соприкасается с другим блоком. Чтобы определить, с какой частью другого блока граничит рассматриваемый блок, нужно рассмотреть смежный ему интерфейс. Таким образом, полная информация о касании двух соседних блоков описывается парой смежных интерфейсов.

Во время проведения расчетов различные блоки сетки обрабатываются независимо друг от друга. Однако некоторые ячейки обрабатываемого блока должны обращаться за данными к ячейкам соседних блоков, с которыми этот блок граничит через интерфейсы. Если два соседних блока обрабатываются на разных узлах

суперкомпьютера, то для обмена данными между ними можно использовать MPI-обмены. Если ячейка в процессе проведения вычислений обращается за данными на другой вычислительный узел, то будем называть ее кросс-ячейкой.

Одним из важнейших действий по управлению расчетной сеткой при расчетах на суперкомпьютере является дробление ее блоков. В связи с тем, что при запуске задач на суперкомпьютере постоянно возрастает степень параллельности (используется все больше параллельных процессов обработки блоков сетки), то для сохранения равномерности распределения блоков по вычислительным процессам требуется уметь изменять блоки. Кроме блоков сетка содержит другие объекты, которые требуют корректировки после разделения блока, например, это интерфейсы и граничные условия. Каждый из этих объектов имеет жесткую привязку к блоку, а значит после дробления блока может возникнуть потребность его разделения. Механизм дробления блоков расчетной сетки позволяет равномерно загружать вычислительные ресурсы суперкомпьютера, что способствует эффективному масштабированию расчетной задачи при увеличении количества вычислительных узлов.

Распределение нагрузки между вычислительными узлами

Рассмотрим простой жадный алгоритм равномерного распределения блоков расчетной сетки по вычислительным узлам суперкомпьютера. Весом блока будем называть количество его ячеек, весом вычислительного узла - сумму весов сопоставленных с ним блоков. Тогда задача равномерного распределения блоков по узлам может ставиться в следующим виде: распределить блоки расчетной сетки по вычислительным узлам таким образом, чтобы вес наиболее тяжелого узла был минимальен. Заметим, что точное решение данной задачи связано с большой комбинаторной сложностью, поэтому будем искать приближенное решение, не сильно отклоняющееся от оптимального.

Жадный алгоритм для достижения данной цели можно сформулировать следующим образом. В начале работы алгоритма блоки сетки не приписаны никаким вычислительным узлам. Пока есть блоки сетки, не приписанные никаким вычислительным узлам, нужно взять из них самый тяжелый блок и отнести его к самому легкому вычислительному узлу, после чего повторить данную процедуру необходимое число раз. Данный алгоритм всегда завершает работу и показывает хорошие результаты на сетках с большим количеством блоков, среди которых отсутствуют ярко выраженные крупные блоки. Однако, при наличии крупных блоков требуется использовать их дробление. В этом случае предлагается использовать следующую модификацию данного алгоритма. Сначала требуется установить предельное допустимое отклонение веса наиболее загруженного вычислительного узла от среднего значения, при достижении которого алгоритм завершает работу. Такое отклонение в дальнейшем будем обозначать *dev*. Применить жадный алгоритм распределения весов блоков по вычислительным узлам. Если требуемое отклонение наибольшего веса вычислительного узла от среднего значения достигнуто, то завершить работу. В противном случае разделить максимальный блок пополам по наиболее протяженному направлению, после чего произвести перераспределение.

Такой модифицированный жадный алгоритм с дроблениями пополам будем обозначать UG (от uniform greedy). Данный алгоритм также всегда завершает работу, однако в отдельных случаях может выполнять необоснованно большое количество дроблений блоков, что приводит к возрастанию количества кросс-ячеек, а значит тормозит межпроцессные обмены между блоками сетки. Для устранения крупных блоков без лишних дроблений предлагается механизм минимизации количества разрезов блоков.

Прежде всего определим, на какие части может быть разрезан конкретный блок, имеющий размеры ISize, JSize, KSize и содержащий соответственно ISize * JSize * KSize ячеек.

На возможные разрезы блока накладываются следующие ограничения. Так как блок может быть разрезан только по границам ячеек, то размеры получившихся новых блоков будут кратны одному из значений $\text{ISize} * \text{JSize}$, $\text{ISize} * \text{KSize}$, или $\text{JSize} * \text{KSize}$. На самом деле целесообразно выполнять разрезы только по наиболее протяженному направлению (пусть это будет ISize , для каждого блока это направление будет свое), так как это приводит к минимизации количества кросс-ячеек. Для сохранения точности расчетов запрещается выполнять разрезы блока слишком близко к границе. Для этого вводится специальный параметр margin , по которому разрешается деление блока только в сегменте $[\text{margin}, \text{ISize} - \text{margin}]$. Вводится еще одно ограничение, не позволяющее производить слишком мелкие блоки (задается наименьшее допустимое количество ячеек в результирующем блоке, при котором разрешено дробление).

Алгоритм распределения блоков по вычислительным узлам с минимизацией количества разрезов (в дальнейшем будем обозначать его MCC, от minimal cuts count) будем описывать в следующем виде:

1. Определить среднее ожидаемое количество ячеек, которое должно приходиться на один вычислительный узел, будем обозначать эту величину mid . Она равна общему количеству ячеек сетки, деленному на количество вычислительных узлов proc .

2. Определить максимально допустимый вес вычислительного узла на текущий момент (будем обозначать через max). Изначально max берется равным mid . Однако если в процессе распределения вес какого-либо вычислительного узла превысил mid , то величина max принимает значение веса этого узла. Таким образом max определяется как максимум из величины mid и весов всех вычислительных узлов.

3. Определить множество всех блоков, которые еще не распределены ни на один вычислительный узел. Если данное множество пусто, то алгоритм заканчивает работу.

4. Попробовать найти из рассматриваемого множества блоков такой блок, который можно распределить на один из вычислительных узлов так, чтобы вес

этого узла не превысил max . Если таких блоков несколько, то нужно взять такой блок, который максимально приближает вес соответствующего вычислительного узла к отметке max . Если это удалось, то распределить найденный блок на вычислительный узел и перейти к п. 3.

5. Определить множество допустимых разрезов всех не распределенных на текущий момент блоков. Каждый потенциальный разрез делит блок на две части. Определить множество таких потенциальных результирующих блоков и из этих потенциальных блоков выбрать блок веса w и вычислительный узел веса W такие, что $W + w \leq \text{max}$ и величина $\text{max} - (W + w)$ минимальна. Если такой пары блок-узел не найдено, то найти такую пару, что $W + w > \text{max}$ величина $(W + w) - \text{max}$ минимальна. Такая пара найдется всегда. После этого выполнить необходимый разрез для получения найденного блока и распределить его на соответствующий вычислительный узел, после чего перейти к п. 2.

Кроме описанных действий данный алгоритм содержит ряд эвристик, не позволяющих проявляться негативным эффектам при возникновении сложных краевых случаев (например, неконтролируемый рост величины max). Таким образом, описанный алгоритм на каждом шаге пытается выполнить такой разрез блока, чтобы максимально приблизить вес некоторого вычислительного узла к ожидаемой в среднем величине загрузки.

Для тестирования и оценки эффективности описанных выше методов распределения блоков блочно-структурированной сетки между узлами суперкомпьютерного кластера использовались три разные сетки, отличающиеся по количеству блоков: test (13 блоков, 5.8 млн. ячеек), train (30 блоков, 10.7 млн. ячеек), ref (136 блоков, 8.5 млн. ячеек).

В качестве целевого вычислительного ресурса брался гомогенный вычислительный кластер, состоящий из 64 узлов. Величина margin , характеризующая минимальное расстояние разреза от границы блока,

бралась равной 5. На Рис. 6 представлены данные применения алгоритмов UG и МСС к каждой из приведенных расчетных сеток. Описание данных на графиках: mid — средний ожидаемый вес вычислительного узла, dev — отклонение веса наиболее тяжелого узла от dev, proc — количество вычислительных узлов, cuts — количество выполненных разрезов, iface cells и cross cells — доля интерфейсных и кросс-ячеек среди всех ячеек сетки.

На каждом графике на Рис. 6, представлена гистограмма распределения

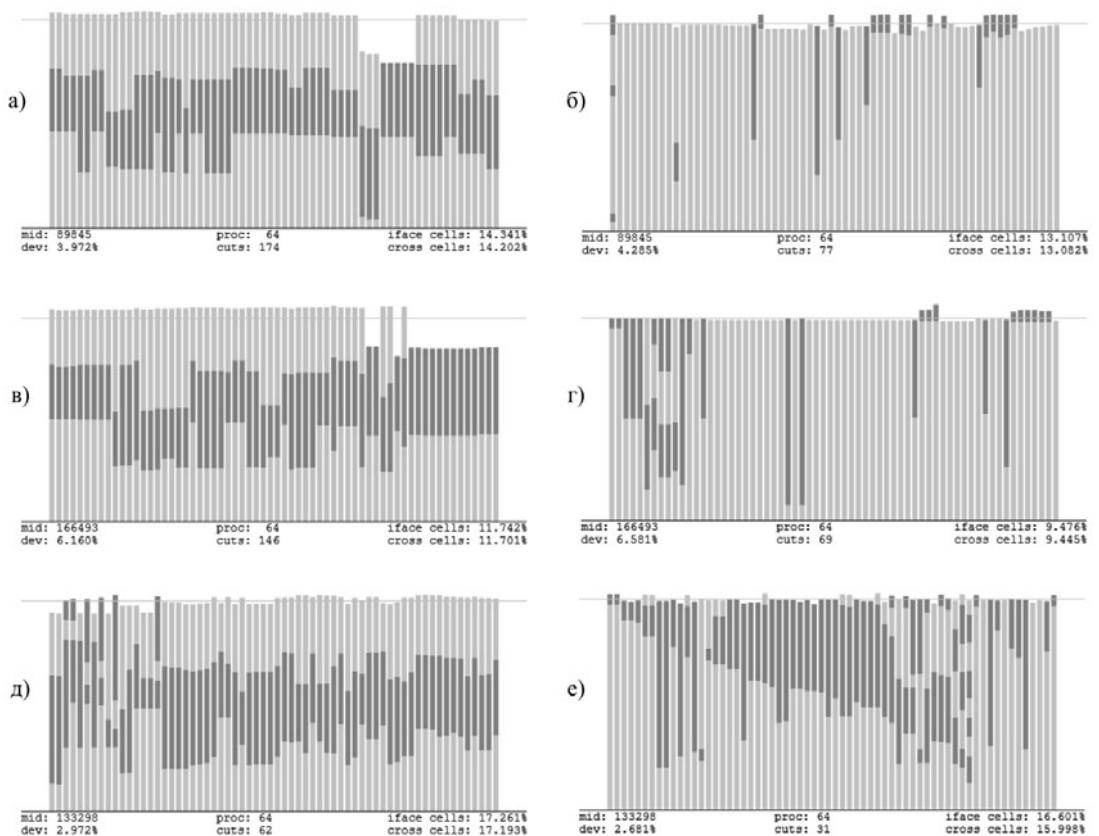
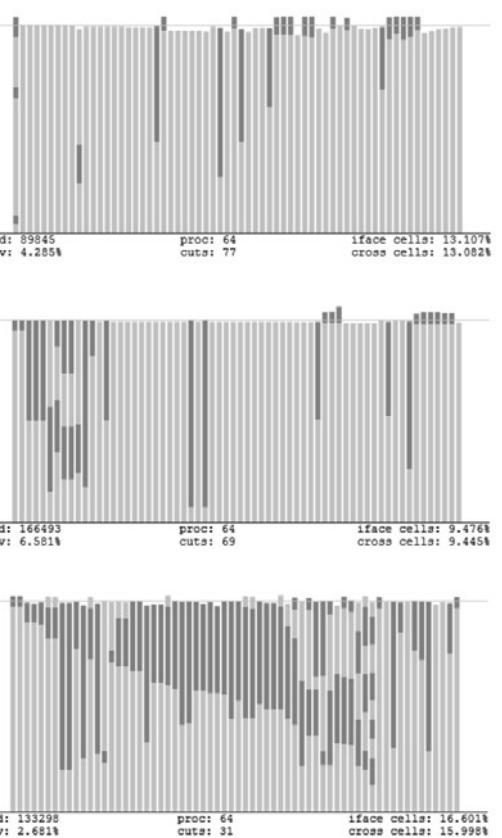


Рис. 6. Гистограммы распределения блоков расчетной сетки по вычислительным узлам суперкомпьютера для сеток test (а, б), train (в, г), ref (д, е) с помощью алгоритмов UG (а, в, д) и МСС (б, г, е).

Результаты сравнения эффективности методов UG и МСС распределения вычислительной нагрузки между узлами суперкомпьютера показывают, что использование метода МСС оправдано, так как с его помощью можно добиться распределения не худшего качества (а зачастую и лучшего), чем при использовании UG.

При этом МСС позволяет существенно сократить количество разрезов

блоков расчетной сетки по вычислительным узлам. Каждый столбец гистограммы соответствует одному вычислительному узлу. Высота столбца — вес соответствующего вычислительного узла. Если к вычислительному узлу отнесены несколько блоков расчетной сетки, то соответствующий столбец гистограммы разделен на несколько частей, размеры которых отражают веса блоков, также эти части раскрашены в шахматном порядке для повышения наглядности.



блоков сетки для достижения требуемого результата.

Также использование МСС приводит к сокращению количества кросс-ячеек в сетке, что положительно сказывается на скорости межпроцессных обменов данными.

Особенно явно достоинства метода МСС проявляются на сетках с относительно небольшим количеством блоков и наличием ярко выраженных крупных блоков.

Проведение расчетов на суперкомпьютере

Для численного исследования было выбрано модельное плоское двухскаковое ВЗУ высокоскоростного летательного аппарата, описанное в начале статьи. Для данного объекта проводились численные расчеты на суперкомпьютере с использованием RANS/ILES метода. Для проведения численных расчетов использовалась блочно-структурная расчетная сетка, содержащая 172 блока, 848 интерфейсов, 323 граничных условия, 12.8 миллионов ячеек. Для распределения вычислительной нагрузки для данной сетки использовался алгоритм МСС с дроблением

блоков.

В качестве вычислительного поля использовались узлы суперкомпьютера МВС-10П, находящегося в МСЦ РАН, каждый вычислительный узел содержит по 2 микропроцессора Intel Xeon E5-2697v3 (Haswell) [7].

Были выполнены запуски расчетов в двух конфигурациях: с запуском двух MPI процессов на каждом процессоре и с запуском четырех MPI процессов на каждом процессоре. Количество вычислительных узлов варьировалось от 1 до 18.

В качестве эталонного запуска, относительно которого считались ускорения, был выбран запуск на одном узле с двумя MPI процессами на каждом процессоре.

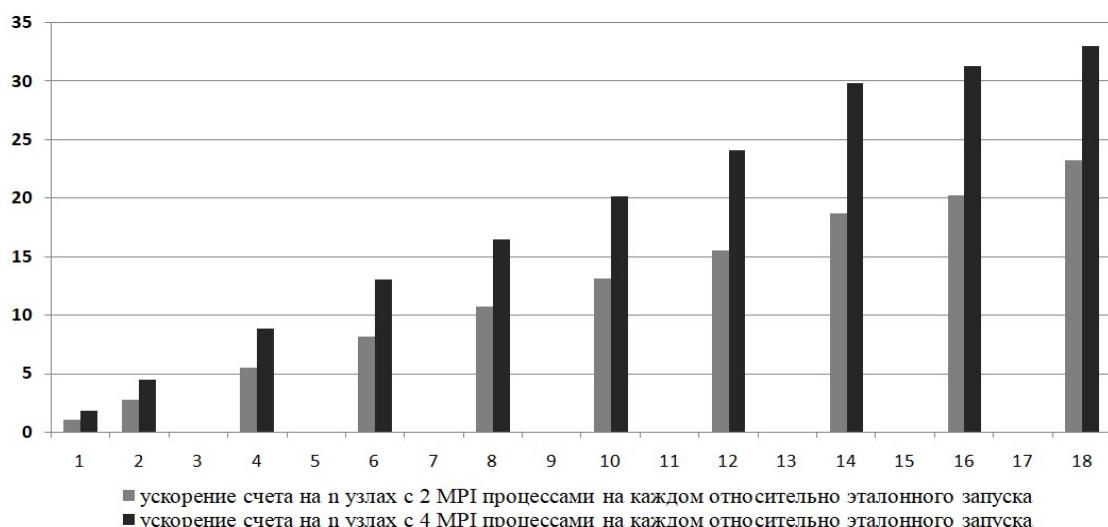


Рис. 7. Ускорение запусков на различном числе узлов относительно эталонного запуска при проведении газодинамических расчетов на модельном входном устройстве воздухозаборника на суперкомпьютере с использованием RANS/ILES метода.

Из данных, приведенных на Рис. 7, можно видеть сверхлинейное ускорение при увеличении количества расчетных узлов. Так, при использовании 18 узлов с двумя MPI процессами на каждом процессоре было достигнуто 23-кратное ускорение относительно эталонного запуска. Такое сверхлинейное ускорение объясняется как равномерностью распределения вычислительной нагрузки между узлами суперкомпьютерного кластера, так и снижением интенсивности и повышением локальности обращений в память при увеличении количества вычислительных узлов. При использовании 4 MPI процессов на каждом процессоре эффективность счета

увеличивается, при этом линейное масштабирование сохраняется.

Заключение

Показано, что применение RANS/ILES-метода высокого разрешения к расчету высокоскоростного воздухозаборного устройства позволяет определить характеристики течения и границы его устойчивой работы.

Организация параллельных вычислений в расчетных кодах RANS/ILES, а также использование специальных подходов в подготовке расчетной сетки, выраженной в дроблении ее блоков и распределении

вычислительной нагрузки между узлами суперкомпьютера, позволило достичь сверхлинейной масштабируемости расчетов задач газовой динамики на вычислительном кластере МСЦ РАН. Так при увеличении количества расчетных узлов до 18 штук было достигнуто ускорение расчетов в 23 раза.

Развитие методов повышения эффективности использования суперкомпьютеров при численном решении задач газовой динамики является актуальной задачей, так как при верной подготовке вычислений может быть достигнуто линейное и даже

сверхлинейное ускорение на достаточно большом количестве узлов вычислительного кластера.

Это в свою очередь приводит к ускорению исследования и проектирования сверхзвуковых летательных аппаратов.

Работа выполнена в МСЦ РАН при поддержке программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные основы технологий двойного назначения в интересах национальной безопасности».

Scaling of fluid dynamic calculations using the RANS/ILES method on supercomputer

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

Abstract. The actual problem of calculating the characteristics of a nonstationary turbulent flow inside a high-speed aircraft inlet is considered. Such calculations are usually performed on a supercomputer. Using a supercomputer cluster containing a large number of nodes leads to the problem of effectively scaling the runs performed. The article describes the algorithm for distributing the computational load between the nodes of a supercomputer using the block-structured grid cutting and presents the results of scaling calculations on the JSCC RAS supercomputer.

Keywords. Fluid dynamics, numerical methods, RANS/ILES, supercomputer, scaling, computational workload distribution.

Литература

1. H.-J. Tan, S. Sun, Z.-L. Yin. Oscillatory flows of rectangular hypersonic inlet unstart caused by downstream mass-flow choking. *Journal of Propulsion and Power*. 2009, V. 25, № 1, P. 138-147.
2. Z. Li, W. Gao, H. Jiang, J. Yang. Unsteady behaviors of a hypersonic inlet caused by throttling in shock tunnel. *AIAA J.* 2013. V. 51, No. 10. P. 2485- 2492.
3. Д.А.Любимов, И.В.Потехина. Исследование нестационарных режимов работы сверхзвукового воздухозаборника RANS/ILES-методом // ТВТ. 2016, Т. 54, № 5, С. 784–791.
4. О.С. Аладышев, Н.И. Дикарев, А.П. Овсянников, П.Н. Телегин, Б.М. Шабанов. СуперЭВМ: области применения и требования к производительности. *Известия высших учебных заведений. Электроника*. 2004, № 1, С. 13-17.
5. 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.
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. Описание интерфейса пользователя, предназначенного для работы с интеловской гибридной архитектурой суперЭВМ (СК), где вместе с процессорами Intel Xeon используются сопроцессоры Intel Xeon Phi. URL: <http://www.jscc.ru/informat/MVS-10PIter.pdf>.