

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ НА КЛАСТЕРНЫХ СИСТЕМАХ ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ВЕНТИЛЯЦИИ ШУМОТЕПЛОЗАЩИТНОГО КОЖУХА ГАЗОТУРБИНОЙ УСТАНОВКИ

Д.А. Чарнецв¹, В.И. Кочуров²

¹ОАО НПО «Искра», г. Пермь

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Одним из наиболее важных направлений деятельности НПО «Искра» является разработка газоперекачивающих агрегатов. В последнее время большую актуальность приобрели численные трехмерные газодинамические исследования проточных трактов газоперекачивающих агрегатов. Одним из наиболее сложных с точки зрения течения воздуха и распределения газодинамических характеристик является проточный тракт системы охлаждения газотурбинной установки (ГТУ), а именно пространство под шумотеплозащитным кожухом (КШТ), где располагается ГТУ. На рис. 1 представлена схема системы охлаждения ГТУ одного из газоперекачивающих агрегатов, разработанных НПО «Искра».

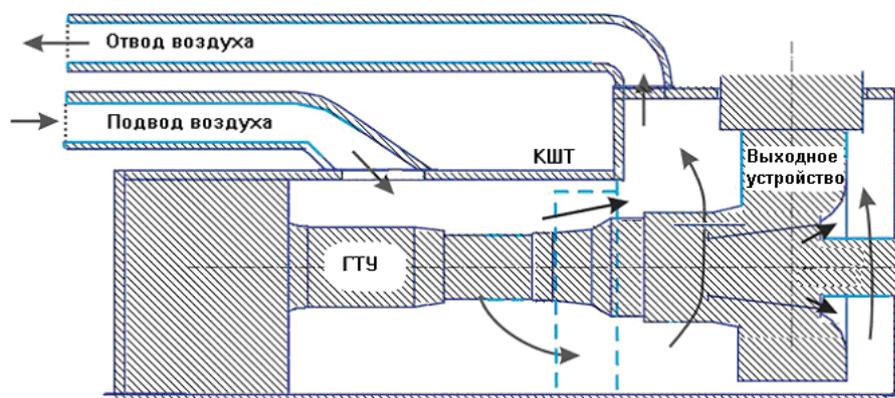


Рис. 1

ГТУ размещается под КШТ с целью снижения шума на территории компрессорной станции. Кроме ГТУ под кожухом устанавливается различное электрооборудование: это датчики систем газообнаружения и пожаротушения, светильники и кабели. Элементы этого оборудования имеют различную температуру эксплуатации. В результате вентиляции из-под КШТ выносятся горячий воздух и поддерживается приемлемый для оборудования температурный режим. Главной проблемой при этом является существенно неравномерное распределение температур в пространстве под КШТ, там могут образовываться зоны с высокотемпературным воздухом. В связи с этим важно знать поле температуры для правильного размещения элементов оборудования под КШТ, то есть возникает необходимость в численном исследовании параметров потока охлаждающего воздуха под КШТ и распределения его температуры.

Для решения перечисленных выше задач требуется трехмерное численное моделирование течения под КШТ. Для описания газодинамических процессов, происходящих под КШТ, была разработана математическая модель, основанная на системе уравнений

Эйлера, а также программа для численного решения поставленных краевых задач газовой динамики. В качестве численного метода использовался метод крупных частиц Давыдова. Данный метод позволяет достаточно хорошо исследовать течения газа при сложной геометрии границ расчетной области в двух- и трехмерном случае. Для простоты использовалась явная конечноразностная схема, расчетная сетка – однородная ортогональная.

Распараллеливание на кластере

Для повышения скорости вычислений разработан алгоритм реализации метода крупных частиц для проведения параллельных вычислений на кластере. Использование конечноразностных явных схем и однородной ортогональной сетки делает процедуру распараллеливания метода крупных частиц довольно простой. Вся расчетная область с помощью секущих плоскостей делится на подобласти, расчет для каждой из которых передается одному процессору кластера. Для каждой подобласти организуется обмен данными граничных слоев расчетных ячеек между ней и подобластями, непосредственно к ней прилегающими.

Разработанная программа трехмерного газодинамического расчета изначально проектировалась с перспективой параллелизации. Основная особенность расчетного алгоритма программы заключается в отсутствии трехмерного массива расчетных ячеек. Каждая расчетная ячейка имеет прямую ссылку на своих соседей. В частности, это помогает разрешить конфликт определения значений компонент скорости в фиктивной ячейке. Например, в фиктивных ячейках, на границе с которыми заданы условия прилипания, векторы равны по величине и противоположны по направлению векторам скорости в расчетных ячейках. При этом возможно возникновение ситуации, когда одна и та же фиктивная ячейка должна иметь разные вектора скорости для разных расчетных ячеек. Этот конфликт разрешается введением дополнительной фиктивной ячейки, причем это введение никак не сказывается на основном расчетном алгоритме.

По такому же принципу происходит деление расчетной области при параллелизации. Если рассмотреть две подобласти, которые граничат друг с другом, то ячейки пограничного слоя одной подобласти имеют ссылки на ячейки в пограничном слое соседней подобласти. При параллелизации вводятся фиктивные слои ячеек, с которыми устанавливается связь пограничных ячеек. Во время между шагами интегрирования происходит обмен данными по схеме, приведенной на рис. 2. Таким образом, механизмы обмена данными не изменяет основной расчетный алгоритм.

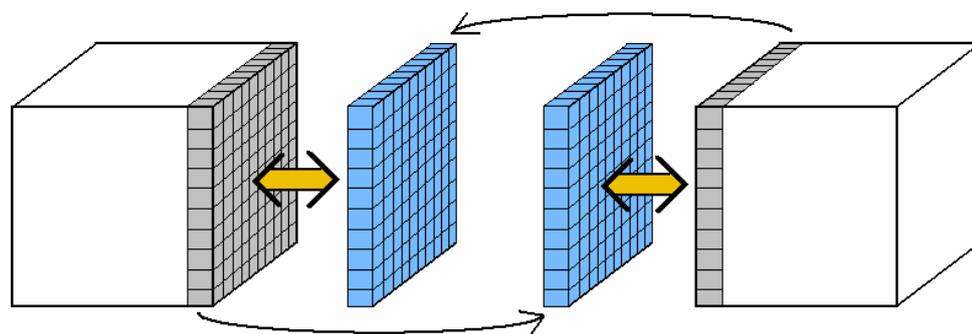


Рис. 2

Распараллеливание на многоядерном процессоре

Отдельно был разработан алгоритм реализации метода крупных частиц для проведения параллельных вычислений на многоядерном процессоре. Отличие его от кластерного варианта заключается в отсутствии специально вызываемых процедур обмена

данными между подобластями; соответственно, не вводятся и фиктивные слои ячеек для обмена данных. Расчетная область делится секущими плоскостями на подобласти, число которых равно числу ядер процессора. Деление осуществляется оптимальным образом с точки зрения равномерного распределения расчетных ячеек. Расчет каждой подобласти отдается отдельному ядру процессора. Так как все ядра процессора имеют общую память, то расчетные ячейки, находящиеся в одной расчетной подобласти, имеют прямые ссылки на расчетные ячейки из других подобластей, как и в алгоритме без параллелизации.

Оптимизация разбиения на подобласти при распараллеливании

Расчетная область краевой задачи газовой динамики вписывается в параллелепипед, который в дальнейшем будет называться расчетным пространством. Расчетное пространство разделяется на кубические аппроксимационные ячейки. Общее количество аппроксимационных ячеек $N_{общ}$ можно вычислить по формуле (1):

$$N_{общ} = N_x \cdot N_y \cdot N_z, \quad (1)$$

где N_x, N_y, N_z – количество ячеек по сторонам расчетного параллелепипеда, стороны соответственно направлены вдоль осей X, Y, Z. Вследствие геометрии расчетной области при равномерном разбиении расчетного пространства секущими плоскостями расчетные ячейки неравномерно распределяются по подобластям. Так как скорость параллельных вычислений определяется самой медленной скоростью вычислений на узле кластера, то разбиение нужно осуществить таким образом, чтобы величина самого большого расчетного объема (то есть подобласти с наибольшим количеством расчетных ячеек) была минимальной. Для этого надо решить задачу оптимизации разбиения расчетного пространства.

На рис. 3 представлена схема разбиения расчетного пространства на подобласти.

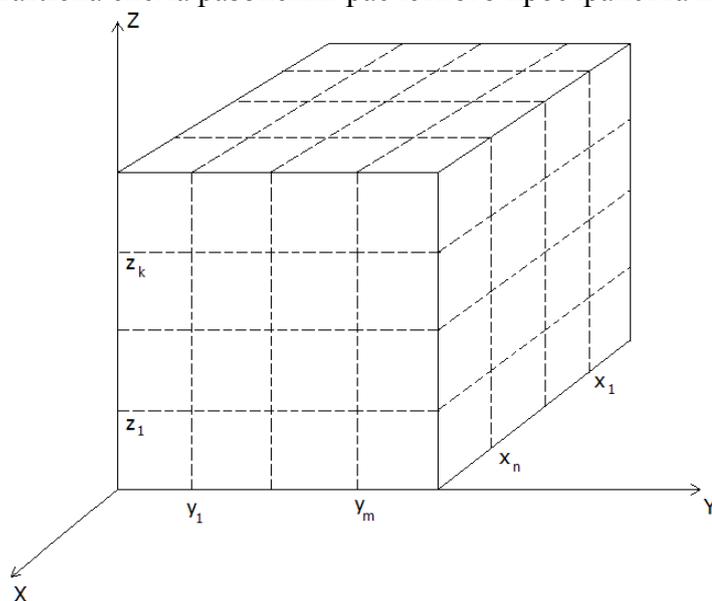


Рис. 3

Здесь x_1, \dots, x_n ($y_1, \dots, y_m; z_1, \dots, z_k$) – целочисленные координаты секущих плоскостей, перпендикулярных оси X (Y; Z). Критерием оптимизации выступает максимальное количество расчетных ячеек в расчетной подобласти, которое является функцией от координат секущих плоскостей ($x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_m, z_1, \dots, z_k$):

$$J = \max_i (N_{расч i}) = f(x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_m, z_1, \dots, z_k), \quad (2)$$

где $N_{расч i}$ – количество расчетных ячеек в i -ой расчетной подобласти.

Решается следующая задача оптимизации:

$$\begin{aligned}
 & J \rightarrow \min, \\
 & 1 < x_1 < x_2 < \dots < x_n < N_x, \\
 & 1 < y_1 < y_2 < \dots < y_m < N_y, \\
 & 1 < z_1 < z_2 < \dots < z_k < N_z, \\
 & x_i, y_i, z_i \in \mathbf{N},
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

где \mathbf{N} – множество натуральных чисел. Решение задачи оптимизации для реальных расчетных областей позволяет повысить скорость параллельных расчетов примерно в два раза относительно равномерного исходного разбиения.

Увеличение производительности расчетов

Для характерных размеров расчетной сетки получено ускорение в семь с половиной раз при разбиении на 32 расчетные подобласти. При измельчении сетки наблюдается рост производительности относительно нераспараллеленных расчетов. Однако с точки зрения сокращения общего времени расчета дальнейшее измельчение сетки не приносит выгоды, так как растет общий объем вычислений.

На рисунке 4 показано полученное увеличение производительности при использовании технологии MPI в зависимости от количества разбиений. Количество ядер здесь говорит о том, сколько на каждом узле кластера используется ядер процессора. График максимального роста производительности соответствует ситуации, когда полностью отсутствуют потери на обмен данными между расчетными подобластями. Его отличие в меньшую сторону от линейной зависимости обуславливается невозможностью достижения равномерного по количеству расчетных ячеек разбиения исходной расчетной области.

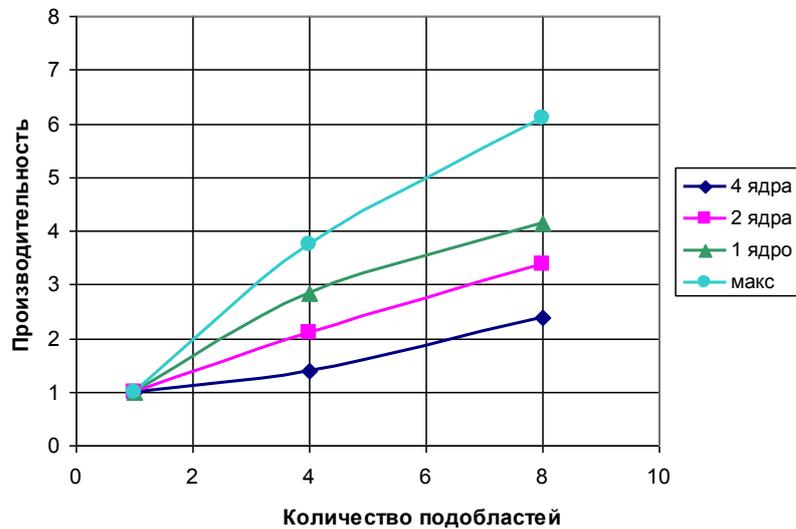


Рис. 4

Интересным представляется тот результат исследований, что наибольшее ускорение достигается при более интенсивном обмене данными между различными узлами кластера, нежели при обмене между ядрами одного процессора узлов кластера. Чем больше задействуется различных узлов, и соответственно меньше процессорных ядер на каждом узле, при одном и том же количестве расчетных подобластей, тем более высоким отмечается рост производительности расчетов.