# АЛГОРИТМЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ МНОГОМЕРНЫХ РАСЧЕТОВ В МЕТОДИКЕ ТИМ

*Т. Н. Половникова*, *А. А. Воропинов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Методика ТИМ [1–2] предназначена для решения многомерных нестационарных задач механики сплошных сред на неструктурированных лагранжевых сетках произвольного вида.

По методике ТИМ можно рассчитывать широкий набор процессов: газовую динамику и упругопластичность, детонацию, теплопроводность, магнитную гидродинамику с учетом диффузии магнитного поля, многопотоковую газодинамику и другие процессы.

Ячейками сетки являются в двумерном случае произвольные несамопересекающиеся многоугольники, в трехмерном случае – произвольные несамопересекающиеся многогранники, которые не обязательно выпуклые. Грани состоят из произвольного количества узлов, в узлах сетки сходится произвольное количество ребер.

Для повышения точности проводимых расчетов необходимо производить численное моделирование на сетках с большим количеством ячеек. Проведение таких расчетов требует значительного календарного времени. Один из путей сокращения сроков – проведение расчетов в параллельном режиме счета.

Эффективное выполнение счетных программ на многопроцессорных машинах с распределенной памятью требует декомпозиции данных по процессам таким образом, чтобы распределение вычислительной нагрузки было равномерным, а количество межпроцессных обменов минимальным. Получение качественной декомпозиции является актуальной проблемой особенно для методик, использующих неструктурированные сетки.

В методике ТИМ задача выполнения декомпозиции сводится к решению задачи о разрезании графа на подграфы. Вершина графа соответствует ячейке сетки, а ребро – соседству между ячейками. В качестве исходных данных используется граф, отображающий структуру сетки. Возможно использование различных весов вершин и ребер графа.

В процессе численного моделирования объем вычислений для конкретной ячейки может изменяться (за счет алгоритмов поддержания качества счетной сетки, использования различных уравнений состояний, кинетических моделей: кинетика детонации, кинетика разрушения и т. д.). На обсчет такой ячейки (или всей параобласти) может тратиться больше времени, значит, может появиться несбалансированность, а распределение вычислительной нагрузки по процессам должно быть оптимальным. Также в процессе численного моделирования по методике ТИМ в задаче могут образовываться струйные и вихревые течения, локально могут утончаться и перебиваться параобласти, параобласти могут претерпевать изломы вблизи параллельной границы, которые могут приводить к увеличению межпроцессных обменов.

Опыт проведения расчетов показал, что основная проблема заключается не в получении изначально плохой декомпозиции, а в постепенном ухудшение качества декомпозиции в процессе проведения расчета из-за работы различных алгоритмов. Таким образом, видно, что необходима балансировка вычислительной нагрузки.

Алгоритмы балансировки для сеточных методик можно классифицировать следующим образом:

1) статическая балансировка (выполняется на этапе декомпозиции, учитывая весовые функции).

2) квази-динамическая балансировка (передекомпозиция в процессе счета).

3) динамическая балансировка (передача ячеек между параобластями внутри математической области).

Данная работа посвящена алгоритмам динамической балансировки.

## Алгоритмы динамической балансировки

Динамическая балансировка основана на передаче ячеек между параобластями внутри математической области без выполнения операций сохранения контрольных точек и вообще каких-либо внешних данных. Динамическая балансировка лишена недостатков квази-динамической балансировки, так как она не требует выполнения дорогостоящей операции сохранения и чтения контрольной точки и полной передекомпозиции задачи.

Однако динамическая балансировка не лишена недостатков, ограничивающих ее применение. В частности, довольно часто при разбалансировке наиболее и наименее загруженные параобласти принадлежат различным математическим областям. По смыслу динамической балансировки передача ячеек в этом случае напрямую невозможна, так как между параобластями отсутствует коммуникация. Т. е. возможны ситуации, когда динамическая балансировка не может напрямую решить проблему разбалансировки или потребуется множество операций передачи ячеек.

Например, в случае отсутствия прямого взаимодействия между перегруженными и недогруженными по вычислительной нагрузке параобластями одной математической области может использоваться передача ячеек через параобласти с удовлетворительной загруженностью.

Другой проблемой для динамической балансировки может являться ситуация, когда вычислительная нагрузка меняется очень резко. Такая ситуация возможна, например, когда на старте задачи первоначальная декомпозиция делается без использования весовых функций, а затем в процессе счета определяется время на расчет ячеек. В результате может оказаться, что первоначальная декомпозиция неудачна, вплоть до того, что некоторые процессы должны сменить набор ячеек полностью. В этом случае объем передаваемых данных между параобластями внутри математической области чрезвычайно большой, и оказывается, что гораздо быстрее выполнить передекомпозицию. Результаты работы алгоритмов динамической балансировки за несколько шагов представлены на рис.1, 2:

**Критерии динамической балансировки вычислительной нагрузки**

Набор критериев для проведения динамической балансировки вычислительной нагрузки состоит из двух частей:

1) критерии анализа необходимости выполнения операции улучшения качества декомпозиции:

– разбалансированность по вычислительной нагрузке,

– параобласть близка к перебитию (по типу «песочные часы»);

2) критерии выбора ячеек для переброски:

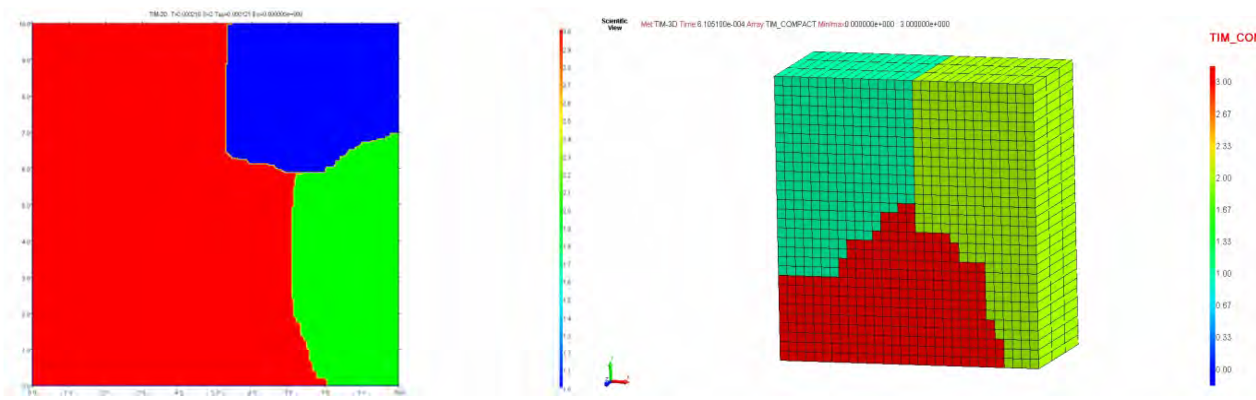
– ячейка из заданного списка,

– неоптимальное отношение по количеству внутренних и граничных ребер (2D) и внутренних и граничных граней (3D),

– неоптимальное отношение по длине внутренних и граничных ребер (2D) и по площади внутренних и граничных граней (3D),

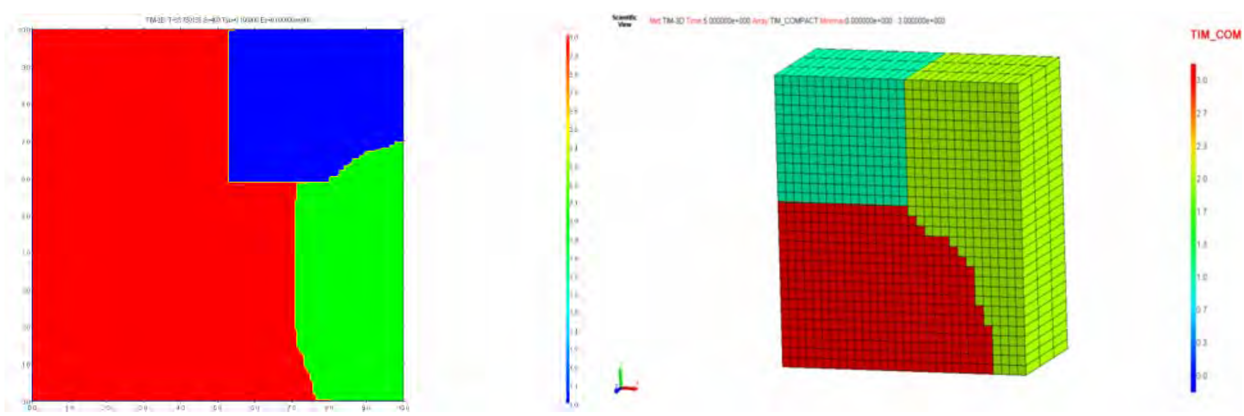
– ячейка максимального веса,

– ряд критериев, вырабатываемых программами поддержания качества сетки.




а б

Рис. 1. Начальные декомпозиции: а – двумерный случай, б – трехмерный случай




а б

Рис. 2. Полученные декомпозиции через несколько шагов в результате работы алгоритмов динамической балансировки: а – двумерный случай, б – трехмерный случай

Пользователь может управлять, какими критериями он хочет воспользоваться для улучшения качества декомпозиции и динамической балансировки.

## Тестовые расчеты

Работа алгоритмов переброски ячеек для динамической балансировки тестировалась на модельной задаче о плоской волне на трех вычислительных узлах. Для тестирования была использована четырехугольная сетка. Такая сетка позволяет не использовать алгоритмы поддержания качества сетки [5] и, благодаря этому, общий объем вычислений не зависит от вида декомпозиции. Это позволяет корректно оценить влияние алгоритмов переброски на общее время расчета, если изначально была принудительно задана несбалансированная декомпозиция. При разбалансировке больше 5% появляется необходимость в использовании алгоритмов динамической балансировки. Тестовые расчеты проводились с использованием двух критериев: критерия разбалансировки вычислительной нагрузки и критерия неоптимального отношения внутренних и внешних ребер по их количеству. После отработки критерия разбалансировки получаются пары номеров параобластей, между которыми необходимо выполнить переброску ячеек.

На рис. 3 представлен фрагмент четырехугольной сетки с разбалансировкой 97 %. Расчет 100 шагов с такой декомпозицией занял 101,4 сек.

На рис. 4 разбалансировка по процессам составляет примерно 5 %. Расчет 100 шагов с такой декомпозицией занял по времени 90,1 сек.

Таким образом, для получения разбалансировки менее 5 % необходимо было перебросить 20 % ячеек между параобластями, что привело к ускорению счета на 11 %.

На рис. 5 представлено сравнение одного и того же фрагмента четырехугольной сетки до переброски ячеек, рис. 5а, и после, рис. 5б.

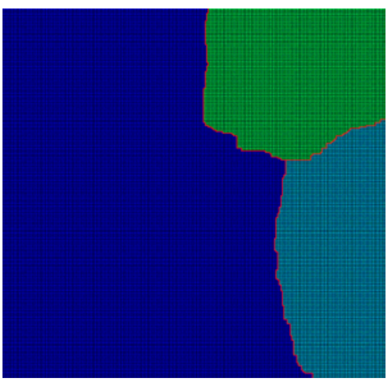


Рис. 3. Фрагменты четырехугольной сетки с разбалансировкой 97 %

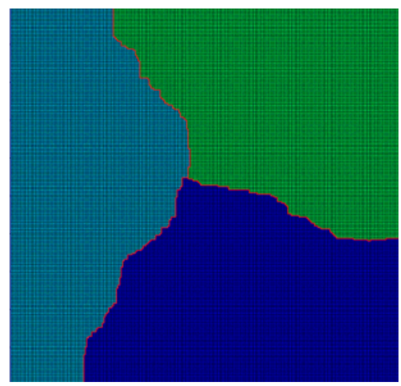
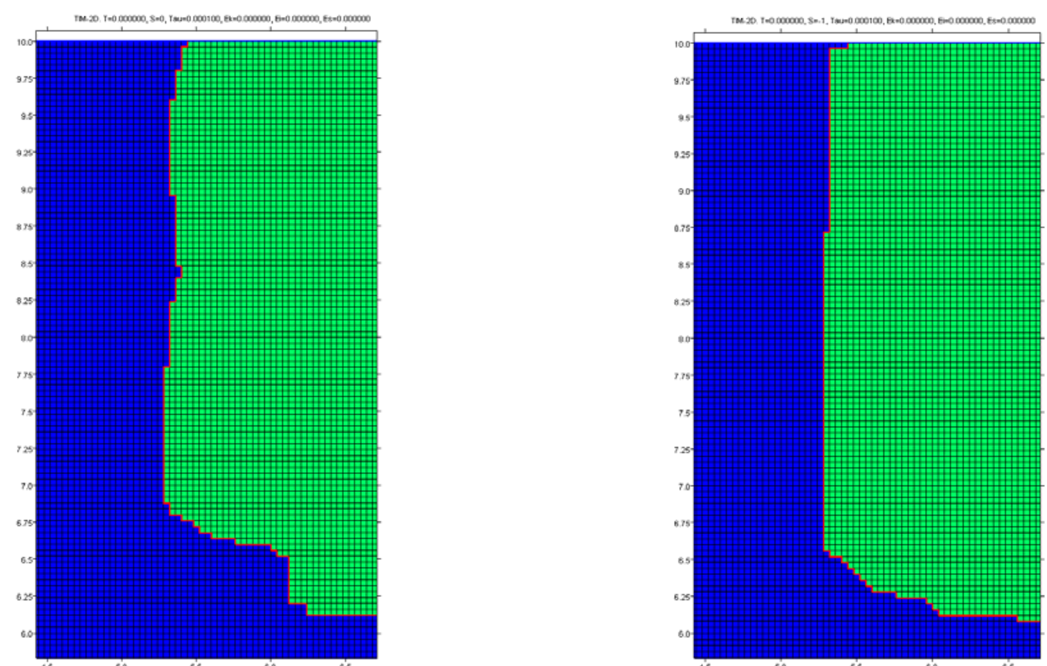


Рис. 4. Фрагмент четырехугольной сетки с разбалансировкой примерно 5 %



а б

Рис. 5. Фрагменты четырехугольной сетки: а – до переброски ячеек, б – после переброски ячеек

Таким образом, в результате работы алгоритмов получается более ровная граница, т. е. уменьшается длина границы, что приводит к уменьшению объемов обменов между процессами.

Были проведены тестовые расчеты трехмерной задачи, которая состоит из 5 математических областей, количество ячеек и параобластей в каждой из которых представлено в табл. 1, сетка шестигранная. Задача считалась на 9 вычислительных узлах по 16 процессорных ядер в каждом.

Алгоритмы динамической балансировки дают дополнительную вычислительную нагрузку. Поэтому при хорошей сбалансированности вычислительной нагрузки между узлами в задаче данные алгоритмы могут давать замедление, т. к. работают только критерии анализаторы необходимости переброски, а сама переброска не выполняется. Тем не менее несмотря на то, что в тестовом расчете использовались декомпозиции хорошего качества, и то что в тесте рассчитывается всего 200 шагов, получено ускорение на 3,7 %.

Таблица 1

Количество ячеек по математическим областям

| **Номер математической области** | **Количество ячеек** | **Количество параобластей** | |
|---|---|---|---|
| | | **Тест 1** | **Тест 2** |
| 1 | 132505 | 3 | 4 |
| 2 | 61392 | 3 | 3 |
| 3 | 157560 | 3 | 3 |
| 4 | 4648 | Параобласти не создавались | |
| 5 | 533830 | 7 | 7 |
| Общее количество ячеек | 889935 | | |
| Коэффициент разбалансировки, % | | 12 | 5 |

В данном случае использовались критерий разбалансировки вычислительной нагрузки и критерий неоптимального отношения внутренних и внешних граней по их количеству.

В расчетах с алгоритмами динамической балансировки варьировались следующие параметры:

– коэффициент разбалансировки: 1 %, 3 %, 5 % и 10 %,

– максимальное количество перебрасываемых ячеек за шаг: 20, 50 и 100.

Реберный коэффициент был равен 0,9 (реберный коэффициент определяет отношение количества разрезанных внешних и внутренних ребер графа).

Задача считалась 200 шагов.

В табл. 2 указаны ускорения по времени при расчетах с алгоритмами динамической балансировки:

Таким образом, исходя из полученных результатов видно, что для данной задачи (при расчете с реберным коэффициентом 0.9) оптимальными оказались следующие параметры: коэффициент разбалансировки 3% и количество максимально перебрасываемых ячеек за шаг равно 50.

## Заключение

Работа алгоритмов, реализующих описанные критерии, была продемонстрирована на ряде методических расчетов. Применение алгоритмов динамической балансировки вычислительной нагрузки позволяет ускорить счет и эффективно загрузить процессорное поле, выделенное на задачу. Таким образом, на двумерной модельной задаче без корректировки сетки

Таблица 2

Ускорение по времени в расчетах с алгоритмами балансировки относительно расчетов без них

| **Максимальное число перебрасываемых ячеек за шаг** | **Коэффициент разбалансировки, %** | **Ускорение, %** | |
|---|---|---|---|
| | | **Тест 1** | **Тест 2** |
| 20 | 1 | 1 | –1,7 |
| | 3 | 3 | 0,6 |
| | 5 | 2,6 | –2 |
| | 10 | 2,1 | –3 |
| 50 | 1 | 3 | 1 |
| | 3 | 3,7 | 2,3 |
| | 5 | 1 | –1,6 |
| | 10 | 2,1 | –3 |
| 100 | 1 | 2,1 | –3 |
| | 3 | 2,6 | 1,7 |
| | 5 | 2,1 | –2,3 |
| | 10 | 2,3 | –3 |

в результате отработки критериев балансировки было получено ускорение на 11 %, на изначально хорошо сбалансированной трехмерной модельной задаче с использованием всего аппарата поддержания качества сетки в многообластной постановке – ускорение на 3,7 %.

В дальнейшем планируется провести исследование на серии сложных расчетов для выбора оптимального набора параметров, подходящего для решения широкого класса прикладных задач.

## Литература


1. Соколов С. С., Панов А. И., Воропинов А. А. и др. Методика ТИМ расчета трехмерных задач механики сплошных сред на неструктурированных многогранных лагранжевых сетках // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2005. Вып 3. С. 37–52.

2. Соколов С. С., Воропинов А. А., Новиков И. Г. и др. Методика ТИМ-2D для расчета задач механики сплошной среды на нерегулярных многоугольных сетках с произвольным количеством связей в узлах // Там же. 2006. Вып. 4. С. 29–43.

3. Воропинов А. А., Новиков И. Г., Соколов С. С. Распараллеливание в модели смешанной памяти для расчета задач газодинамики в методике ТИМ-2D // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Научно-исследовательское издание. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2013. С. 84–99.

4. Воропинов А. А., Новиков И. Г., Соколов С. С. Методы мелкозернистого распараллеливания в методике ТИМ-2D // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Мат. модел. физ. процессов. 2012. Вып. 3. С. 24–33.

5. Новиков И. Г., Панов А. И., Соколов С. С. Способ коррекции нерегулярной лагранжевой сетки методом наложения дифференцируемых связей // Журнал вычисл. мат. и мат. физ. 2005. Т. 45, № 8. С. 1487–1500.