

## Разработка алгоритма параллельных вычислений при решении задач газовой динамики

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

**Ключевые слова:** алгоритм, параллельные вычисления, газовая динамика, технология RPC, метод установления, локальная сеть

**Ключові слова:** алгоритм, паралельне обчислювання, газова динаміка, технологія RPC, метод установлення, локальна мережа

**Keywords:** algorithm, parallel calculations, gas dynamic, RPC technique, pseudoviscosity method, local network

### Введение

Существует множество задач, решение которых требует огромных затрат временных ресурсов электронно-вычислительной техники. К числу такого рода задач относятся нестационарные трёхмерные задачи механики сплошных сред вообще и газовой динамики, в частности. Вследствие того, что процесс расчёта занимает достаточно длительное время, возникает необходимость сократить его каким-либо образом для решения поставленной инженерной задачи за практически приемлемые сроки. Одним из приемов уменьшения временных затрат является организация параллельных вычислений.

### Анализ существующих методов распараллеливания

В настоящее время для решения задач большой размерности находят применение технологии распределенных вычислений RPC (Remote Procedure Call), ORB (Object Request Broker), MOM (Message-oriented Middleware), DCE (Distributed Computing Environment), мониторы транзакций, ODBC [1]. Учитывая требования задачи, а также такие преимущества локальных компьютерных сетей, как одинаковость платформ в системе, возможность учитывать нагрузку компьютеров в сети, синхронность связи с серверами и т.д., делаем вывод о применении технологии RPC, как наиболее подходящей для решения поставленной задачи.

Технология RPC – процедурная блокирующая синхронная технология, предложенная фирмой Sun Microsystems. В ней вызов удаленных программ подобен вызову функций в языке C, а пересылка данных на основе транспортных протоколов TCP или UDP осуществляется в едином формате обмена XDR. Синхронность и блокирование означают, что клиент, обратившись к серверу, для продолжения работы ждет ответа от сервера [2].

Ускорение, получаемое при использовании параллельного алгоритма для процессоров, по сравнению с последовательным вариантом выполнения вычислений, определяется так:

$$S_p(n) = \frac{T_i(n)}{T_p(n)}, \quad (1)$$

т.е. как отношение времени решения задач на скалярной ЭВМ к времени выполнения параллельного алгоритма (величина  $n$  используется для параметризации вычислительной сложности решаемой задачи и может пониматься, например, как количество входных данных задачи).

Эффективность использования параллельным алгоритмом процессоров при решении задачи определяется соотношением:

$$E_p(n) = \frac{T_1(n)}{pT_p(n)} = \frac{S_p(n)}{p} \quad (2)$$

Величина эффективности определяет среднюю долю времени выполнения алгоритма, в течение которой процессоры реально используются для решения задачи. Как следует из приведенных соотношений, в наилучшем случае  $S_p(n) = p, E_p(n) = 1$ .

### Постановка задачи

Рассматривается расчётная область в трёхмерном пространстве, заполненная газом. Она условно разбивается на множество конечных объёмов (рис. 1), в которых набор газодинамических параметров считается известным. С течением времени газодинамические параметры в конечных объёмах меняются под действием массовых сил и сил давления. Для расчёта этих изменений и, соответственно, новых параметров газодинамической среды используется метод явный конечно-разностный С.К. Годунова [3]. Для каждого конечного объёма его можно представить следующим образом.

$$\begin{aligned} a_i^{t+\Delta t} &= f(A_n^t, A_n^t, A_e^t, A_3^t, A_l^t, A_{np}^t); \\ A_n^t &= F(a_n^t, a_m^t); A_n^t = F(a_n^t, a_m^t); \\ A_e^t &= F(a_e^t, a_m^t); A_3^t = F(a_3^t, a_m^t); \\ A_l^t &= F(a_l^t, a_m^t); A_{np}^t = F(a_{np}^t, a_m^t), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $A_x^t$  – набор граничных параметров во время  $t$  (рис. 1);  $a_i^{t+\Delta t}$ ,  $a_n^t$ ,  $a_m^t$ ,  $a_n^t$ ,  $a_e^t$ ,  $a_l^t$ ,  $a_{np}^t$ ,  $a_3^t$  – наборы газодинамических параметров в данном конечном объёме и соседних с ним конечных объёмах в текущий и последующий моменты времени  $t$  и  $t+\Delta t$ .

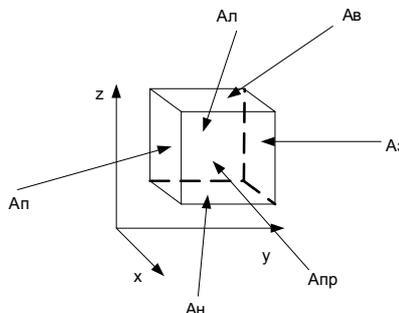


Рис.1. Представление ячейки в трёхмерном пространстве

Таким образом, для получения значений параметров газодинамической среды в ячейках на следующем шаге по времени, необходимо сначала вычислить значения потоков на границах с использованием значений параметров на предыдущем шаге по времени. Так реализуется явный по времени итерационный процесс. В случае задачи установления критерием остановки служит достижение максимальной невязки между газодинамическими параметрами заданной малой величины  $\varepsilon$ , т.е. для любой ячейки выполняется неравенство

$$|a_i^{t+\Delta t} - a_i^t| < \varepsilon. \quad (4)$$

Данный алгоритм расчета необходимо организовать для проведения параллельных вычислений на нескольких компьютерах в локальной сети и, тем самым, уменьшить общее время расчёта.

### Алгоритм организации параллельных вычислений

Вся пространственная расчётная область является параллелепипедом, который разбивается на подобласти (множество параллелепипедов) вдоль одной из осей (рис. 2). Значения газодинамических параметров в конечно-разностных ячейках каждой подобласти рассчитываются на отдельном компьютере локальной сети (серверная часть приложения). Работа всех серверов управляется и синхронизируется клиентской частью приложения, которая в свою очередь тоже располагается на отдельном сетевом компьютере. К машине-клиенту предъявляются повышенные требования с точки зрения ресурсов, т.к. на ней будут храниться параметры всей области, в то время как на машинах-серверах – только параметры подобластей.

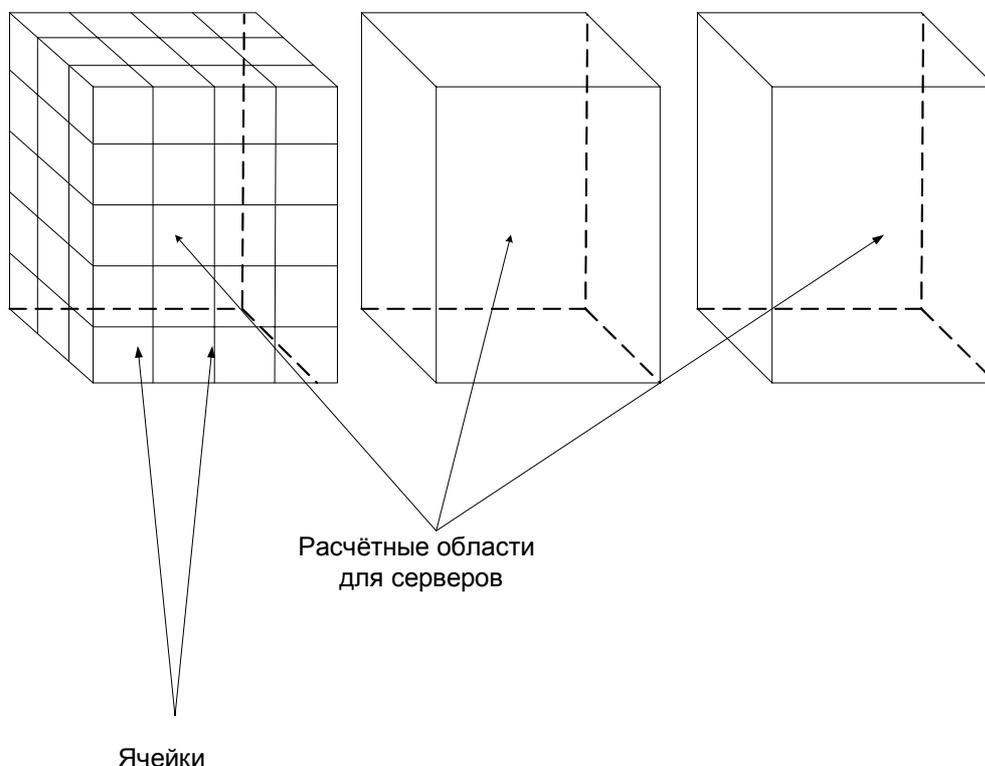


Рис.2. Разбиение трёхмерного пространства на подобласти

Системная структурно-информационная модель показывает логические связи между вычислительными процессами (рис. 3).

Алгоритм распараллеливания компьютерных вычислений можно представить следующим образом.

Шаг 1. Клиентом производится генерация конечно-разностной сетки для всей расчётной области и разбиение ее на  $n$  частей. Осуществляется инициализация газодинамических параметров.

Шаг 2. Компьютером-клиентом пересылается каждому из компьютеров-серверов вся необходимая геометрическая и газодинамическая информация. Она включает параметры смежных ячеек из соседних подобластей для обеспечения расчета граничных потоков массы, импульса и энергии.

Шаг 3. Компьютером-клиентом запрашивается расчёт газодинамических параметров в подобластях для следующего шага по времени на всех серверах и расчёт смежных граничных данных.

Шаг 4. Серверами рассчитываются значения параметров потока газа на новом временном слое. Одновременно вычисляется минимальный шаг по времени для данной подобласти, который обеспечивает устойчивость расчета, если рассматривается нестационарная задача. В случае задачи установления по времени в каждой ячейке используется свой индивидуальный шаг по времени. Рассчитываются критерии остановки расчета по времени для задачи установления. Критерии остановки, пересчитанные параметры смежных ячеек пересылаются клиенту.

Шаг 5. Клиентом рассчитывается глобальный шаг по времени для нестационарной задачи. Этот параметр и необходимые для новой итерации граничные данные снова посылаются каждому из серверов, и производится запрос на расчёт новой итерации и т.д.

Шаг 6. Клиентом производится анализ критериев остановки и принимается решение об остановке расчёта. Если расчёт необходимо остановить, то осуществляется переход на шаг 7. В противном случае осуществляется переход на шаг 9.

Шаг 7. Расчёт выполнен. Компьютером-клиентом производится запрос всем компьютерам-серверам на пересылку результатов расчёта.

Шаг 8. Компьютерами-серверами осуществляется пересылка компьютеру клиенту результатов расчёта в подобластях, происходит объединение результирующих параметров потока для всей расчетной области и их визуализация.

Шаг 9. Получение клиентом смежных данных от каждого из серверов и пересылка необходимых смежных данных каждому из серверов. Переход на шаг 3

Шаг 10.

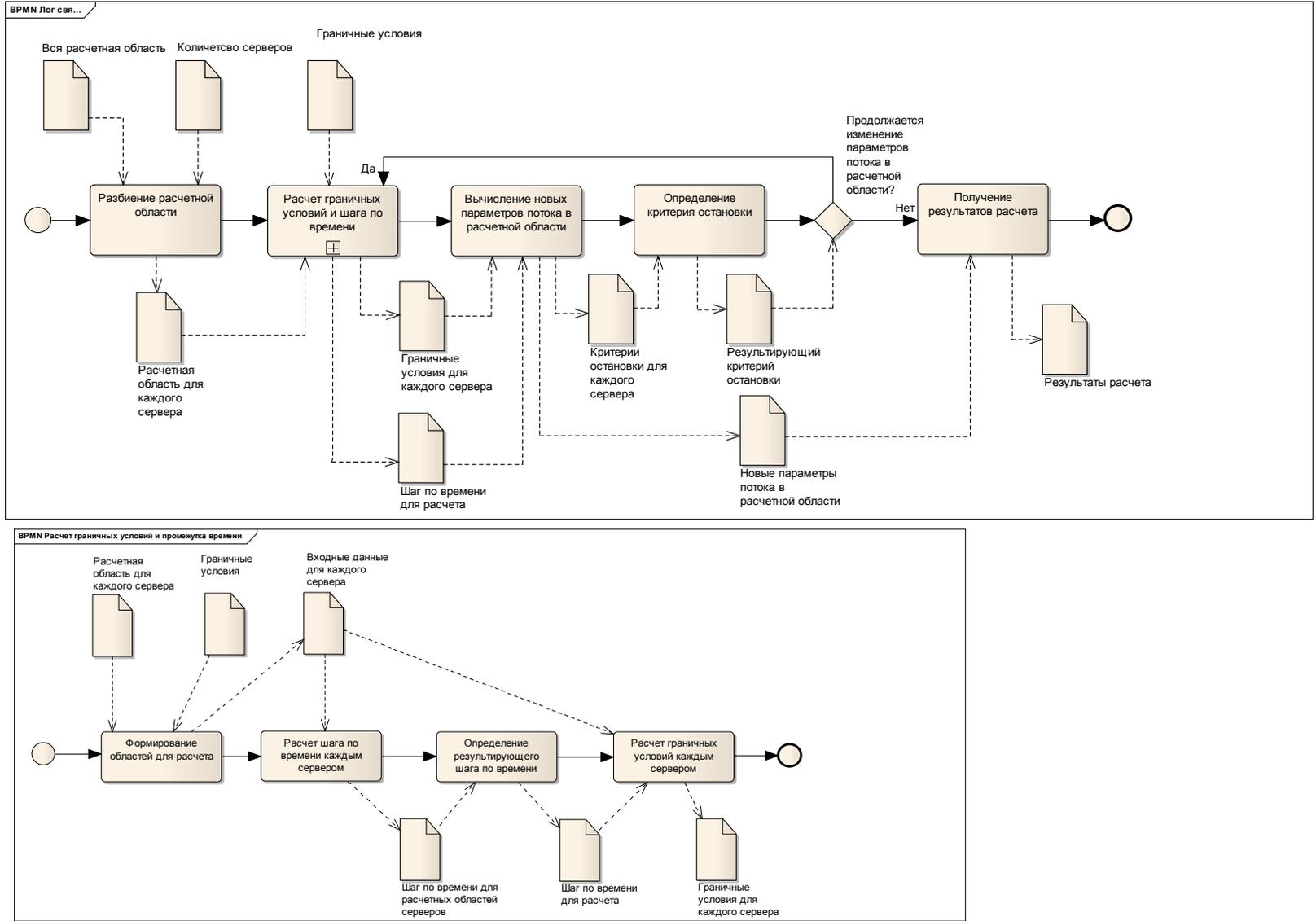


Рис.3. Системная структурно-информационная модель

## Выводы

На основе предложенного алгоритма создан программный продукт, позволяющий имитировать расчёт изменения газодинамических параметров среды с течением времени. Имитация расчета параметров потока обеспечивалась постановкой временной задержки в каждой конечно-разностной ячейке. Рассматривалось 2 случая. В первом случае предполагалось, что время расчёта газодинамических параметров в одной ячейке ( $T$ ) занимает четверть секунды, во втором случае – половину секунды. Результаты представлены на рис. 4 и 5.

На основе расчётных данных получено:

- чем больше сложность расчёта, тем больший выигрыш по времени мы получаем. Таким образом, в первом случае оптимальный результат по времени достигался при 9 и 10 серверах и выигрыш по времени при этом был примерно в 7 раз. Во втором же – оптимальный результат был достигнут при 7 серверах и выигрыш по времени при этом был примерно в 5.5 раз;

- скорость локальной сети оказывает влияние на оптимальный результат. Чем выше пропускная способность сети, тем больший выигрыш по времени можно получить при одинаковой загрузке серверов;

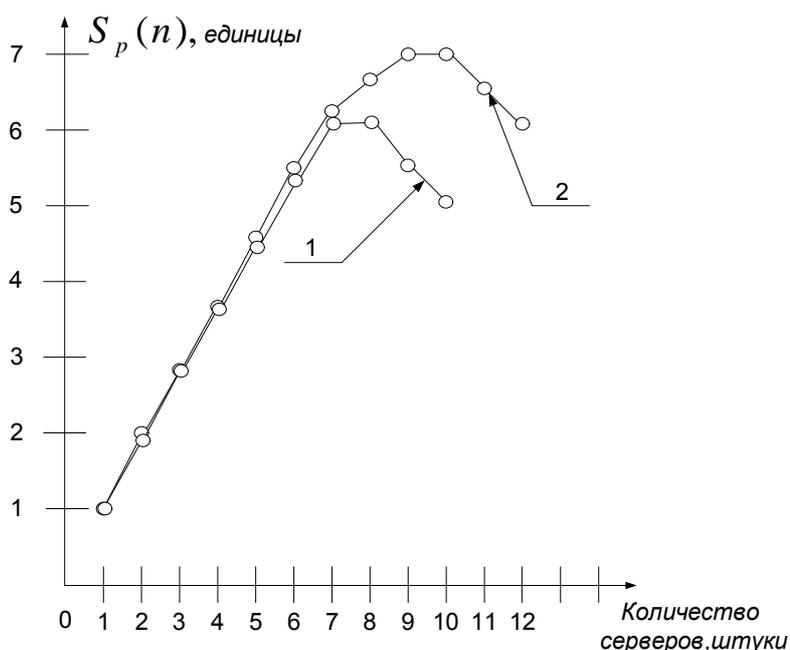


Рис.4. Зависимость ускорения от количества серверов,  
1 –  $T=0.25$  с., 2 –  $T=0.5$  с.

- с увеличением объёмов пересылаемых данных увеличивается и общее время расчёта, однако уже при  $T=0.25$  с влияние этого фактора становится незначительным.

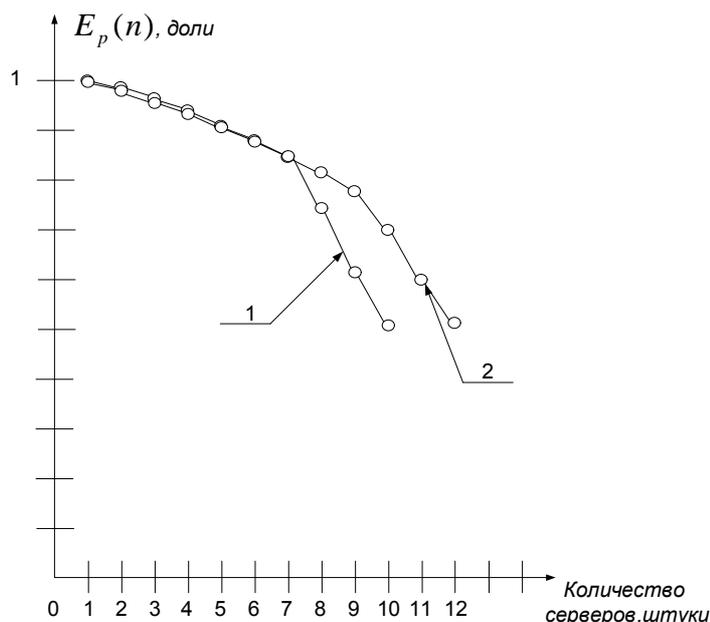


Рис.5. Зависимость эффективности от количества серверов  
1 – T=0.25 с, 2 – T=0.5 с

### Список литературы

1. Локальные вычислительные сети: Справочник / Под ред. С.В.Назарова.– М.: Финансы и статистика, 1994.–250 с.
2. Гергель В.П., Стронгин, Р.Г. Основы параллельных вычислений для многопроцессорных вычислительных систем. Учебное пособие – Нижний Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2003. – 184 с.
3. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов, А.Н. Крайко, Г.П. Прокопов. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1976. – 400 с.
4. Хэлфилд Ричард, Кирби Лоуренс Искусство программирования на С.СПб: ДиаСофт, 2001. – 728 с.
5. Богачев К.Ю. Основы параллельного программирования. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. –175 с.

**Рецензент:** профессор, д.ф.-м.н. Бастеев А.В. Харьковский Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

Поступила в редакцию 13.03.09