

DIVERSIFICATION OF THE STANDARD COOLDOWN SYSTEM OF NPP WITH THE VVER-1200 REACTOR IN EMERGENCY MODE CAUSED BY A RARE EXTERNAL EVENT (DEC C)

*V. V. Bezlepkin, E. P. Obraztsov, D. R. Altbregen, D. V. Kapitsa, M. V. Gavrilov,
V. B. Kozlov, E. G. Ahmedov*

JSC «ATOMPROEKT», Saint-Petersburg

To work on a solution for applying an alternative scheme relatively the standard reactor cooldown system for DEC C mode (emergency caused by a rare external event) we are considering the possibility of implementing a scheme of water-water cooling of the reactor plant from 130 to 70°C through the second circuit systems.

To implement this decision LAH-2 system is included in the second circuit of the power unit. LAH-2 system provides cooling of the coolant of the second circuit (water).

The preparatory stage is necessary for transition to reactor cooldown through the second circuit. This stage includes the heating of pipelines and equipment of secondary circuit systems (which are used to implement the regime) and filling steam generator (SG) and pipelines with second circuit coolant («flooding»).

The report presents calculation results of transient mode from the reactor cooldown through the passive heat removal system (PHRS) to reactor cooldown through the second circuit. The calculation includes the preparatory stage and the beginning of the reactor cooldown process in water-water mode.

The simulation of this mode is carried out using the CSS «VEB» in the SimInTech software with using calculation software KORSAR and TPP (Thermal Power Plant).

Keywords: emergency mode, NPP, virtual power unit, natural circulation, cooldown, reactor.

УДК 519.6

СМЕШАННОЕ РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЕ И ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПРИ РЕШЕНИИ УРАВНЕНИЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ МЕТОДОМ SPH И РЕШЕНИИ УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НА АДАПТИВНО-ВСТРАИВАЕМОЙ СЕТКЕ

И. Д. Блажнов, Н. В. Мелешкин, С. Н. Полищук, Е. И. Рябов

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров

Работа посвящена численному моделированию процессов газовой динамики с теплопроводностью. При решении уравнений используется подход с совмещением двух методов: уравнения газовой динамики решаются методом сглаженных частиц (SPH), а уравнение лучистой теплопроводности для сокращения вычислений решается разностным методом на адаптивно-встраиваемой сетке. В работе рассматриваются алгоритмы распараллеливания вычислений с использованием смешанной модели MPI + OpenMP и алгоритмы балансировки вычислений при комбинировании мето-

дов. На примере решения тестовой задачи о точечном взрыве с учетом теплопроводности проводится исследование эффективности предложенных алгоритмов распараллеливания.

Ключевые слова: Метод сглаженных частиц, разностный метод, смешанное распараллеливание, MPI, OpenMP, балансировка вычислений, эффективность.

Введение

Метод сглаженных частиц (метод SPH) [1] является лагранжевым бессеточным методом, широко применяемым для численного моделирования различных физических процессов механики сплошной среды. Метод SPH является вычислительно затратным, поэтому его эффективное применение затруднительно без использования параллельных вычислений.

Настоящая работа посвящена численному моделированию процессов газовой динамики с теплопроводностью. При решении уравнений используется подход с совмещением двух методов, успешно используемый авторами работы [2]: уравнения газовой динамики решаются методом SPH, а уравнение лучистой теплопроводности, для сокращения вычислений, решается разностным методом на адаптивно-встраиваемой сетке. В работе рассматриваются алгоритмы распараллеливания вычислений с использованием смешанной модели MPI [3] + OpenMP [4] и алгоритмы балансировки вычислений при комбинировании методов. На примере решения тестовой задачи о точечном взрыве [5] с учетом теплопроводности проводится исследование эффективности предложенных алгоритмов распараллеливания.

1. Постановка задачи и расчетный алгоритм

Дифференциальные уравнения, описывающие двумерное течение невязкого теплопроводного газа в переменных Лагранжа, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}\frac{d\rho}{dt} &= -\rho \nabla \bar{u}, \\ \frac{d\bar{u}}{dt} &= -\frac{1}{\rho} \nabla p, \\ \frac{d\varepsilon}{dt} &= -\frac{p}{\rho} \nabla \bar{u} - \frac{1}{\rho} \nabla \bar{q} + Q, \\ \frac{d\bar{r}}{dt} &= \bar{u},\end{aligned}$$

где $\bar{r} = (z, r)$ – вектор перемещения, t – время, ρ – плотность, $\bar{u} = (u, v)$ – вектор скорости, p – давление, ε – удельная внутренняя энергия, Q – источник, $\bar{q} = -\chi \nabla T$ – вектор теплового потока, T – температура, χ – коэффициент теплопроводности.

Система уравнений замыкается уравнением состояния $p = p(\rho, T)$, $\varepsilon = \varepsilon(\rho, T)$ и выражением для коэффициента теплопроводности: $\chi = \chi(\rho, T)$, а также доопределяется начальными и граничными условиями.

Решение данной системы уравнений находится с использованием метода расщепления: сначала определяется изменение скорости, массы и энергии за счет сил давления, затем учитывается изменение энергии за счет источников и теплопроводности. Решение уравнений газовой динамики находится с помощью бессеточного метода SPH, уравнение теплопроводности решается разностным методом на адаптивно-встраиваемой сетке.

Вычисления на одном временном шаге можно условно разделить на блоки, соответствующие этапам вычислительного алгоритма:

1. Балансировка частиц с использованием библиотеки декомпозиции расчетной области Zoltan [6].
2. Блок решения уравнений газовой динамики методом SPH:
 - 2.1. вычисление или корректировка длины сглаживания частиц;
 - 2.2. поиск соседей частиц для газовой динамики, в процессе которого формируется набор вспомогательных сеток на основе разбиения частиц на диапазоны по значениям радиуса сглаживания; в результате поиск соседства для каждой из групп частиц выполняется на своей вспомогательной сетке;
 - 2.3. решение уравнений газовой динамики по явной разностной схеме;
3. Блок решения уравнения теплопроводности разностным методом на адаптивно-встраиваемой сетке:
 - 3.1. построение адаптивно-встраиваемой сетки и пересчет величин с частиц на сетку; построение адаптивной сетки выполняется на каждом временном шаге посредством дробления ячеек начальной декартовой равномерной сетки; основным критерием дробления сетки является ограничение на число частиц в ячейке: если в ячейке число частиц больше заданного, то ячейка дробится по каждому координатному направлению пополам. Процесс дробления повторяется до тех пор, пока не будет достигнут максимальный уровень дробления, или не будет выполнен критерий по числу частиц в ячейке;
 - 3.2. решение уравнения теплопроводности по неявной схеме с использованием решателей библиотеки LParSol [7];
 - 3.3. пересчет величин с сетки на частицы.

2. Распараллеливание вычислений

Программная реализация расчетного алгоритма выполнена на основе структуры хранения данных программы [8], в которой все данные представляются в виде набора линейных массивов. Параллельные вычисления выполняются с использованием двухуровневой смешанной модели MPI+OpenMP: распараллеливание на распределенной памяти с использованием средств MPI [3] – MPI-уровень и распараллеливание на общей памяти с использованием технологии OpenMP [4] – OMP-уровень.

Рассмотрим последовательно, как независимо выполняется распараллеливание двух основных блоков: блок решения уравнения газовой динамики методом SPH и блок решения уравнения теплопроводности на адаптивно-встраиваемой сетке. Распараллеливание на MPI-уровне первого блока основано на геометрической декомпозиции. В расчетной области, представляющей собой прямоугольник, проводится декомпозиция (разбиение) всего счетного ансамбля частиц на набор ансамблей, каждый из которых относится к своему MPI-процессу (рис. 1).

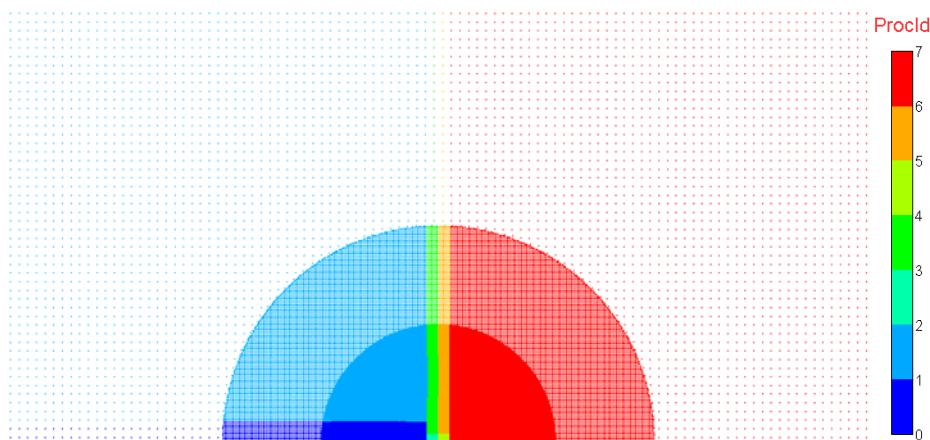


Рис. 1. Декомпозиция ансамбля частиц

При разбиении на ансамбли применяются геометрические методы библиотеки Zoltan. На границах смежности ансамблей добавляются обменные частицы (рис. 2), посредством которых выполняются обмены данными между MPI-процессами. При выполнении обменов используются неблокирующие буферизованные пересылки с последующей проверкой завершения. Также в окрестностях границ расчетной области добавляются граничные частицы, используемые при практической реализации граничных условий.

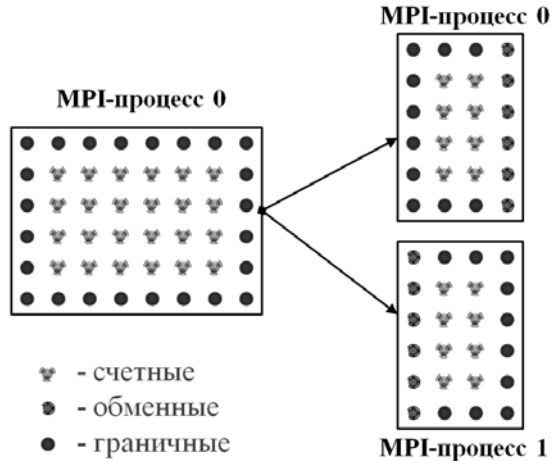


Рис. 2. Обменные и граничные частицы

Распараллеливание на OMP-уровне организуется по ансамблю частиц на каждом MPI-процессе. Данные ансамбля частиц хранятся в линейных массивах, при этом нумерация частиц на MPI-процессе выполняется сквозным образом. Распределение вычислений между OMP-потоками выполняется статически (равномерно по числу частиц) или динамически с заданными порциями (*chunk*) последовательно обрабатываемых частиц (рис. 3).

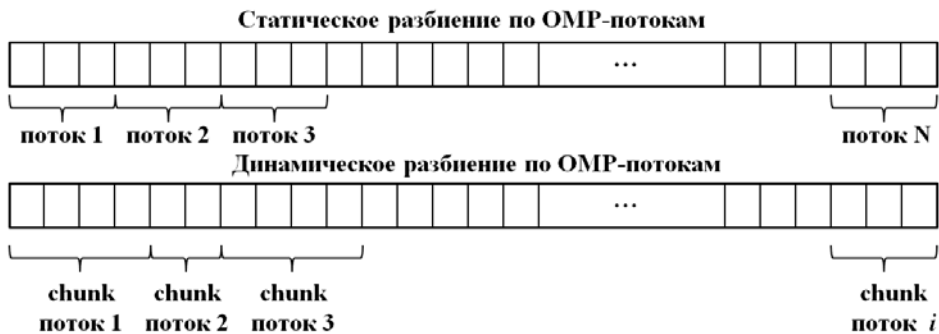


Рис. 3. Распределение вычислений между OMP-потоками

Динамическое разбиение используется в случае, если расчет каждой из частиц имеет разную вычислительную сложность: например, при разном числе соседей у частиц или при использовании разных уравнений состояния вещества для частиц. При одинаковой вычислительной сложности для частиц применяется статическое разбиение.

Распараллеливание блока теплопроводности на адаптивно-встраиваемой сетке выполняется аналогично блоку газовой динамики. При MPI-распараллеливании также используется геометрический принцип. Разбиение адаптивно-встраиваемой сетки выполняется на нерегулярные фрагменты по ребрам ячеек начальной сетки (рис. 4). Каждый фрагмент относится к своему MPI-процессу. На границах смежности фрагментов вводятся обменные слои ячеек для установления парных параллельных обменов.

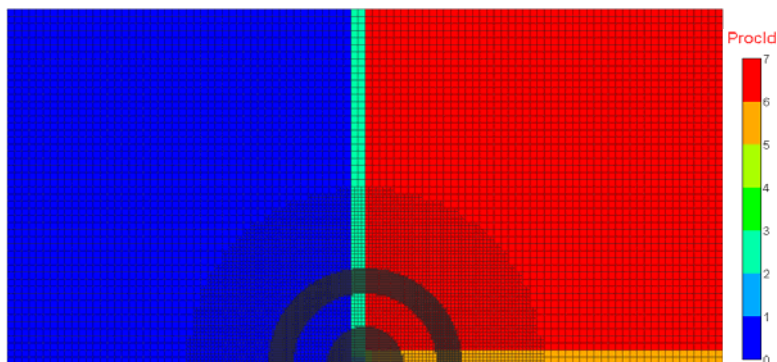


Рис.4. Декомпозиция ансамбля частиц

Поскольку хранение сеточных данных (ячеек и ребер) выполняется в наборах линейных массивов и введена сквозная нумерация для данных, то при ОМР-распараллеливании используется, аналогично методу SPH, статическое и динамическое распределение вычислений между ОМР-потоками.

При совместном решении обоих блоков разбиения на ансамбли частиц и фрагменты адаптивно-встраиваемой сетки согласовываются посредством следующего ограничения: частица относится к тому MPI-процессу, к которому отнесена ячейка базовой сетки, в которой она расположена. При таком подходе пересылка частиц между MPI-процессами выполняется в случае их вылета за границы фрагмента.

3. Балансировка вычислений

Балансировка вычислений предполагает передекомпозицию расчетной области на ансамбли частиц и фрагменты адаптивно-встраиваемой сетки в процессе счета. Использование статических весов (число частиц, число адаптивных ячеек, число соседей у частиц), как показывает практика, хотя и позволяет получать высокие показатели по эффективности счета, однако требует ручной выборки под конкретную задачу. В процессе решения задачи время вычисления каждого из блоков может меняться: при работе источников энергии выполняется интенсивный прогрев вещества, после чего реализуются ударно-волновые процессы, приводящие к интенсивному перемещению частиц. Кроме того, достаточно сильный разброс в вычислениях дает различие как в числе соседей у частиц, так и в сложности вычислений в уравнениях состояния. Поэтому балансировка вычислений выполняется с учетом «чистого» времени работы алгоритма (времени, затраченного MPI-процессом непосредственно на вычисления, без учета затрат на обмены) и последующей нарезки расчетной области с учетом этого времени.

На этапе решения уравнений газовой динамики по методу SPH для всех i -х MPI-процессов вычисляется «чистое» время счета t_{GD_i} , где $i = 1 \dots I$, I – число MPI-процессов. Полученное время равномерно делится на число частиц, отнесенных к данному MPI-процессу. Для сглаживания возможных (как правило, они есть всегда) осцилляций во времени счета шага выполняется осреднение данного времени на счетных шагах:

$$\langle \tilde{t}_{GD_i} \rangle = \frac{\sum_j^{J_i} \frac{t_{GD_i}^j}{nParts_i^j}}{J}, \quad (1)$$

где $nParts_i^j$ – число частиц на j -м счетном шаге i -го MPI-процесса, J – число шагов осреднения.

При решении уравнения теплопроводности на адаптивно-встраиваемой сетке по разностному методу «чистое» время счета t_{HEAT_i} делится на число адаптивных ячеек. Также выполняется его сглаживание на заданном числе счетных шагов:

$$\langle \tilde{t}_{HEATi} \rangle = \frac{\sum_j^{J_i} \frac{t_{HEATi}^j}{nAcells_i^j}}{J}, \quad (2)$$

где $nAcells_i^j$ – число адаптивных ячеек на j -м счетном шаге i -го MPI-процесса, J – число шагов осреднения.

Умножая величины средних «чистых» времен (1) и (2), соответственно, на число частиц в текущей ячейке базовой сетки и на число адаптивных ячеек в ней, вычисляется вес ячейки базовой сетки на MPI-процессе. Используя полученные веса, можно выполнить новую декомпозицию базовой сетки.

В качестве критерия балансировки используется ограничение на максимальную величину дисбаланса «чистого» времени счета. Через заданное число временных шагов выполняется расчет его величины по следующей формуле:

$$dis = \frac{\max_i(t_i) - \min_i(t_i)}{\max_i(t_i)} \times 100\%, \quad (3)$$

где t_i – «чистое» время счета на i -м MPI-процессе, $\min_i(t_i)$ и $\max_i(t_i)$ – соответственно минимальное и максимальное «чистое» время по всем MPI-процессам.

Балансировка выполняется в случае, если величина дисбаланса (3) больше максимально заданного значения.

Ниже приводятся результаты работы алгоритмов балансировки на тестовой задаче, постановка которой представлена в следующем разделе. Расчет выполнен на 28 вычислительных ядрах в режиме 7 MPI x 4 OMP. На рис. 5 и 6, соответственно, показаны результаты замеров времени решения одного шага по времени и дисбаланса по числу частиц, ячеек и времени на MPI-процессах. Процедура балансировки вычислений между MPI-процессами выполнялась при достижении 20 % дисбаланса по «чистому» времени счета между MPI-процессами на 600, 700, 1200 и 2500 временных шагах (отмечены пунктиром на рисунках).

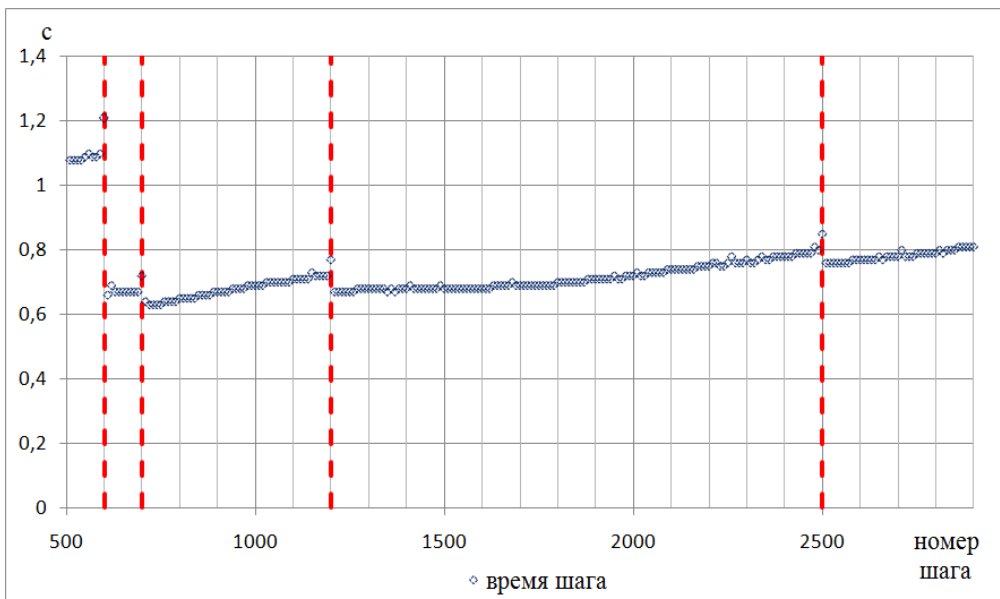


Рис. 5. Время решения одного расчетного шага

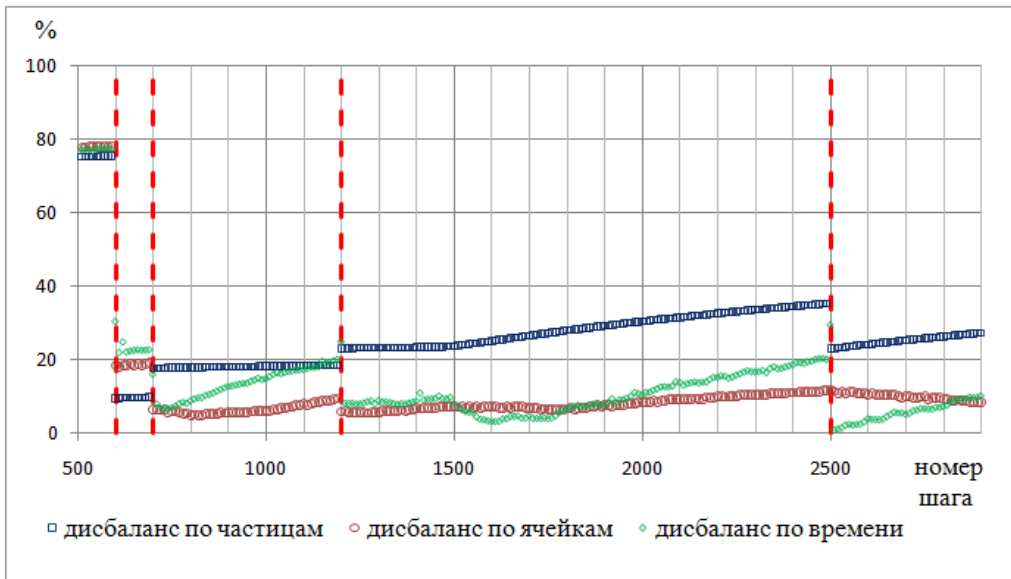


Рис. 6. Дисбаланс по частицам, ячейкам и времени на MPI-процессах

Из результатов, представленных на рисунках, видно, что после выполнения процедуры балансировки, время вычисления одного шага существенно снижается (на 600 шаге было снижено на 30 %), при этом время, потраченное на балансировку, составляет менее 8 % от одного временного шага.

4. Исследование эффективности распараллеливания

Ниже приводятся результаты исследования эффективности распараллеливания вычислений на тестовой задаче о сильном взрыве [5], в которой дополнительно учитывался процесс распространения излучения. Задача решалась в двумерной плоской постановке $-3 \leq z, r \leq 3$. Для вещества в расчетной области использовалось уравнение состояния идеального газа с показателем адиабаты $\gamma = 1,4$, начальная плотность вещества $\rho = 1$, газ находится в состоянии покоя (абсолютное значение скорости $u = 0$). Начальная энергия $E_0 = 10^7$ сосредоточена в шаре радиусом 0,1. Расстановка частиц выполнялась равномерно с шагом 0,005, число частиц 1,44 млн. На границах задано граничное условие – жесткая стенка. Тестовые расчеты выполнены в на 28 ядрах с варьированием числа MPI-процессов и числа OMP-потоков. Выполнены замеры времени решения задачи до момента времени $t = 0.008$.

На рис. 7 и 8 и в табл. 1 и 2 представлены засечки времени вычислений с варьированием числа MPI-процессов и OMP-потоков соответственно. В таблицах используются следующие обозначения: «Идеальное время» – идеальное время вычислений при ускорении, кратном числу MPI-процессов (OMP-потоков); «Время счета» – реальное время вычислений в расчетах с оптимальным набором порций (*chunk*); «Время счета на шаг» – время вычислений в расчетах с оптимальным набором порций в пересчете на один шаг; «Эффективность $F_{\text{эф}}$ » – эффективность счета, вычисляемая по следующей формуле:

$$F_{\text{эф}} = \frac{t_1}{t_N N} \times 100\%,$$

где t_1 – время расчета задачи на одном MPI-процессе или OMP-потоке, t_N – время расчета задачи на N MPI-процессах или OMP-потоках, N – число MPI-процессов или OMP-потоков.

Таблица 1

Временные засечки вычислений с варьированием числа MPI-процессов

Режим счета	Идеальное время, с	Время счета, с	Время счета на шаг, с	Эффективность $F_{эф}$, %
1MPI x 1OMP	6148	6148	7,39	100,00
2MPI x 1OMP	3074	3114	3,74	98,72
4MPI x 1OMP	1537	1596	1,92	96,30
8MPI x 1OMP	768,5	864	1,04	88,95
16MPI x 1OMP	384,25	465	0,56	82,63
28MPI x 1OMP	219,57	281	0,34	78,14

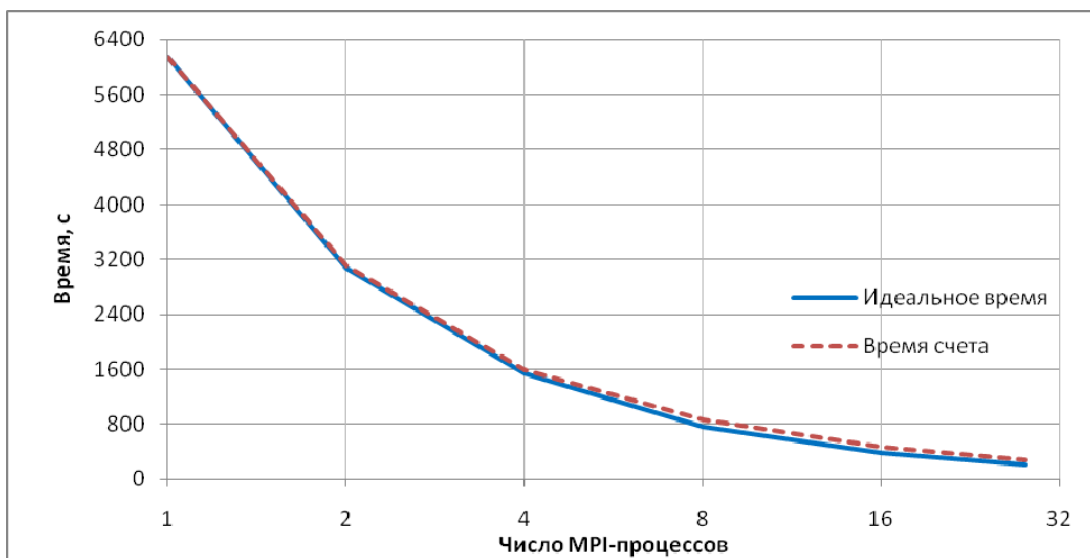


Рис. 7. Зависимость времени счета от числа MPI-процессов

Таблица 2

Временные засечки вычислений с варьированием числа OMP-потоков

Режим счета	Идеальное время, с	Время счета, с	Время счета на шаг, с	Эффективность $F_{эф}$, %
1MPI x 1OMP	6148	6148	7,39	100,00
1MPI x 2OMP	3074	3315	3,98	92,73
1MPI x 4OMP	1537	1824	2,19	84,27
1MPI x 8OMP	768,5	1073	1,29	71,62
1MPI x 16OMP	384,25	643	0,77	59,76
1MPI x 28OMP	219,57	439	0,53	50,02

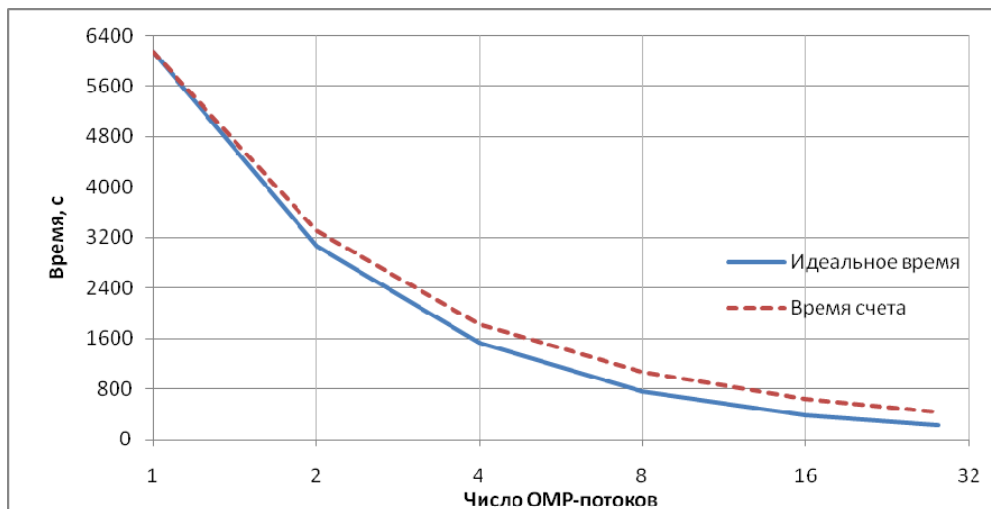


Рис. 8. Зависимость времени счета от числа OMP-потоков

Из приведенных данных видно, что эффективность распараллеливания по методу дробления при увеличении числа MPI-процессов до 28 получена не ниже 78 %, при увеличении числа OMP-потоков до 8 — не ниже 71 %.

На рис. 9 представлены замеры времени решения задачи по методу увеличения. Первая точка на графике соответствует расчету в режиме 4MPI x 7OMP с числом частиц 1,44 млн., вторая 8MPI x 7OMP с числом частиц 2,88 млн. и т. д.

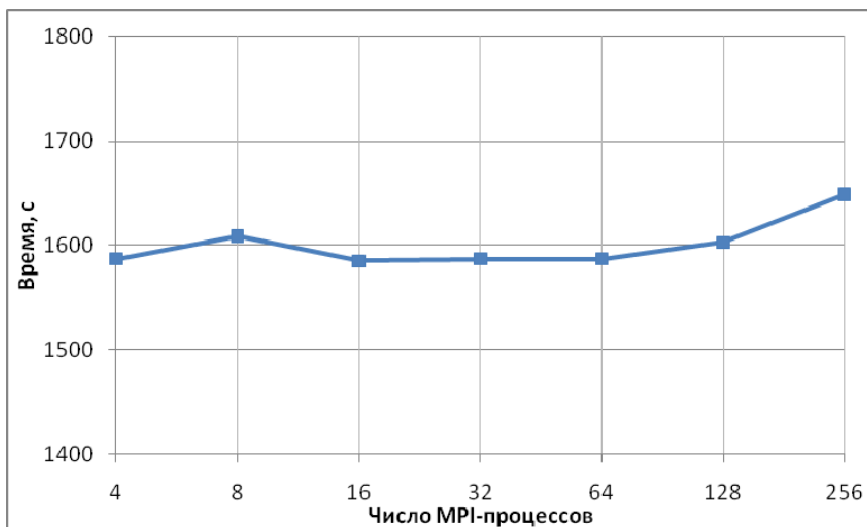


Рис. 9. Зависимость времени счета от числа MPI-процессов

Из графика видна хорошая масштабируемость вычислений: максимальное отличие времени счета не превышает 4 % (от минимального) при 64-кратном увеличении задачи.

Заключение

В работе рассмотрены алгоритмы распараллеливания и балансировки вычислений при объединении метода SPH, используемого для решения уравнений газовой динамики, и разностного метода, используемого для решения уравнения теплопроводности на адаптивно-встраиваемой сетке. Использована двухуровневая модель распараллеливания (MPI+OpenMP). Работоспособность и эф-

фективность алгоритмов продемонстрированы на примере решения тестовой задачи о точечном взрыве (1,44 млн. частиц), в которой дополнительно учитывался процесс распространения излучения. Эффективность распараллеливания при увеличении числа MPI-процессов до 28 получена не ниже 78 %, при увеличении числа OMP-потоков до 8 – не ниже 71%. При масштабировании задачи с кратным (вплоть до 64), по числу MPI-процессов, увеличением числа частиц в режиме с 7 OMP-потоками на один MPI-процесс, изменение времени счета составляет не более 4% от минимального.

Литература

1. Monaghan J. J. Smoothed particle hydrodynamics // Annual reviews of astronomy and astrophysics. – 1992. – № 30. – P. 543 – 575.
2. Зубов А. Д., Лебедев А. М. Метод сглаженных частиц SPH для расчетов газодинамических задач со сферической и цилиндрической симметрией. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. – 2009. – Вып.1. – С. 19 – 28.
3. MPI Documents [Electronic resource]. Mode of access: [<http://www.mpi-forum.org/docs/docs.html>].
4. The OpenMP® API Specification for parallel programming [Electronic resource]. Mode of access: [<http://openmp.org>].
5. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, 1981. – С.243 – 274.
6. Boman E. G., Catalyurek U. V., Chevalier C., Devine K. D. The Zoltan and Isorropia parallel toolkits for combinatorial scientific computing: partitioning, ordering, and coloring // Scientific Programming. – 2012. – P. 129 – 150.
7. Бартенев Ю. Г., Ерзунов В. А., Карпов А. П., Петров Д. А., Пишулин И. А., Стаканов А. Н., Щаникова Е. Б., Капорин И. Е., Милюкова О. Ю., Харченко С. А., Коньшин И. Н., Сысоев А. В., Мееров И. Б. Комплекс библиотек параллельных решателей СЛАУ LParSol версии 3 // XIV Международная конференция «Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах»: сб. докл. Пермь, 2014. – С.49 – 53.
8. Дерюгин Ю. Н., Полищук С. Н., Тихомиров Б. П. Расчет лучистой теплопроводности в методике МРС с использованием неточных методов Ньютона // XV Международная конференция «Супервычисления и математическое моделирование»: сб. науч. тр. / под ред. Р. М. Шагалиева. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2014. – С. 58 – 59.

MIXED PARALLELIZATION AND ARRANGEMENT OF COMPUTATIONS FOR SOLVING GAS DYNAMIC EQUATIONS WITH THE SPH METHOD AND THE HEAT TRANSFER EQUATION ON AN ADAPTABLE MESH

I. D. Blazhnov, N. V. Meleshkin, S. N. Polyshchuk, E. I. Ryabov

Russian Federal Nuclear Center –
All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov

The paper describes the numerical simulation of the gas dynamic processes with heat transfer. To solve equations, the approach combining two methods is used: gas dynamic equations are solved with the smoothed particle hydrodynamics (SPH) method and the radiation heat transfer equation is solved with the difference method using an adaptable mesh. The paper discusses the use in combination of paralleling algorithms using a combined model (MPI+OpenMP) and computation balancing algorithms. The efficiency of the proposed paralleling algorithms is examined by the example of the test problem of a point explosion with regard to heat transfer.

Key words: the smoothed particle hydrodynamics method, difference method, mixed parallelization, MPI, OpenMP, computation load balancing, efficiency.