

**Боровик К. Г., Леонтьев Д. В., Харитонов Д. И.**  
**K. G. Borovik, D. V. Leontev, D. I. Kharitonov**

**ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ ЧИСЛЕННОГО АЛГОРИТМА  
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ПОРИСТЫХ  
ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ**

**ON EFFICIENCY OF NUMERICAL ALGORITHM PARALLELIZATION FOR SIMULATING  
FILTRATION COMBUSTION OF POROUS AXISYMMETRIC OBJECTS**

**Боровик Ксения Григорьевна** – инженер лаборатории № 53 ИАПУ ДВО РАН, ассистент Отделения машиностроения, морской техники и транспорта Дальневосточного Федерального университета (Россия, Владивосток); тел. 8(984)1430948. E-mail: ksushareno@mail.ru.

**Ksenia G. Borovik** – Engineer of Laboratory No. 53 of the IACP FEB RAS, Assistant, Mechanical Engineering, Marine Engineering and Transport Department, Far Eastern Federal University (Russia, Vladivostok); tel. 8(984)1430948. E-mail: ksushareno@mail.ru.

**Леонтьев Денис Васильевич** – ведущий инженер-программист, научный сотрудник ИАПУ ДВО РАН (Россия, Владивосток). E-mail: devozh@dvo.ru.

**Denis V. Leontev** – Senior Software Engineer, Researcher of the IACP FEB RAS (Russia, Vladivostok). E-mail: devozh@dvo.ru.

**Харитонов Дмитрий Иванович** – кандидат технических наук, руководитель группы ЦКП «ДВВР», старший научный сотрудник ИАПУ ДВО РАН (Россия, Владивосток). E-mail: demiurg@dvo.ru.

**Dmitry I. Kharitonov** – PhD in Engineering, Head of the Shared Resource Center «Far Eastern Computing Resource», Senior Researcher at IACP FEB RAS (Russia, Vladivostok). E-mail: demiurg@dvo.ru.

**Аннотация.** Для ускорения расчётов процесса фильтрационного горения пористых осесимметричных объектов разработана параллельная реализация вычислительного алгоритма. Проанализирована эффективность распараллеливания численного алгоритма, проведена оценка времени вычислений в зависимости от числа параллельных процессов и шага расчётной сетки. Показано, что параллельная версия алгоритма значительно сокращает время счёта в сравнении с последовательной версией, при этом эффективность распараллеливания увеличивается с уменьшением шага расчётной сетки.

**Summary.** To accelerate calculations of the filtration combustion process in porous axisymmetric objects, a parallel implementation of the numerical algorithm has been developed. The efficiency of parallelization of the numerical algorithm is analyzed. The computing time is estimated depending on the number of parallel processes and mesh size. It is shown that parallel algorithm significantly reduces computing time compared to sequential algorithm, and at the same time the efficiency of parallelization increases with decreasing the mesh size.

**Ключевые слова:** параллельные алгоритмы, численное моделирование, горение в пористых средах.

**Key words:** parallel algorithm, numerical modeling, combustion in porous medium.

УДК 532.546

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 18-29-24029-мк). Результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Дальневосточный вычислительный ресурс» ИАПУ ДВО РАН.

В настоящей работе развиваются математическая модель и численный метод для исследования нестационарных осесимметричных течений газа через пористые среды с химическими превращениями. Математическая модель строится в предположении взаимодействующих взаимопроникающих континуумов [4] и включает в себя уравнения притока тепла для твёрдой среды и газа,

уравнение неразрывности, уравнение для массовой концентрации окислителя, уравнение движения и уравнение состояния совершенного газа [1–3]. Для исследования этих процессов предложена параллельная реализация разработанного ранее вычислительного алгоритма, основанного на комбинации явных и неявных конечно-разностных уравнений. Предложенное распараллеливание позволяет ускорить время расчёта при моделировании фильтрационного горения различных пористых сред, в том числе металлсодержащих.

Последовательный алгоритм работает следующим образом: сначала определяются начальные значения функций, после этого организуется цикл по времени. На каждом временном слое организуется цикл по горизонтальной координате, внутри которого меняются значения вертикальной координаты и с помощью явной схемы находятся температуры твёрдой среды и газа, скорость газа, массовая концентрация окислителя; затем с помощью метода прогонки решается неявное уравнение, из которого находятся давление и плотность газа из уравнения состояния совершенного газа. После этого вычисляются краевые условия, цикл по времени заканчивается и программа переходит к следующему временному слою, при необходимости выгружая данные в файл.

Распараллеливание алгоритма выполнялось при помощи технологии OpenMP. OpenMP является открытым стандартом для распараллеливания программ на многопроцессорных системах с общей памятью. В результате анализа последовательного алгоритма были выделены участки кода, выполнение которых потенциально может быть ускорено. Распараллеливание алгоритма возможно только по горизонтальной координате. Для этого использовалась директива *parallel for*, предназначенная для распараллеливания циклов. Доступ к данным разграничивается дополнительными операторами директивы: *private* и *shared*; *private* определяет локальные данные каждого потока управления, *shared* – общие данные между всеми потоками.

Тестирование параллельной реализации алгоритма производилось на вычислительном сервере следующей конфигурации: 2 x CPU Intel Xeon E5-2698 v4 (20 ядер, 2,2ГГц), RAM 256 Гб. Тесты производительности совершались для размеров сетки: 0.025, 0.01, 0.005. На рис. 1-3 представлены графики времени выполнения (см. рис. 1), ускорения (см. рис. 2) и эффективности (см. рис. 3) одного модельного часа в зависимости от количества потоков для различного шага сетки для случая горения в пористой среде в условиях естественной конвекции.

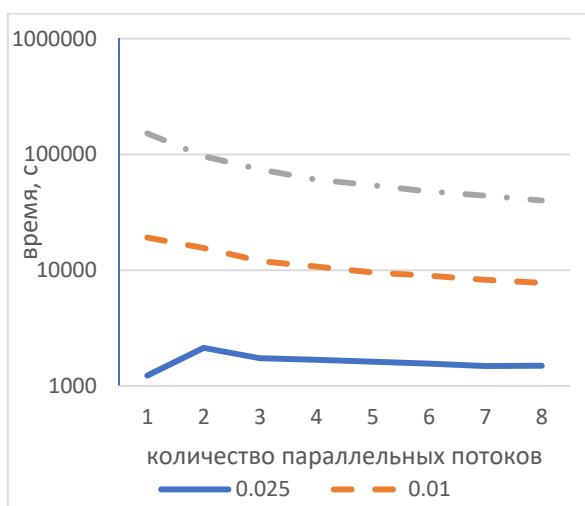


Рис. 1. Время выполнения параллельной реализации

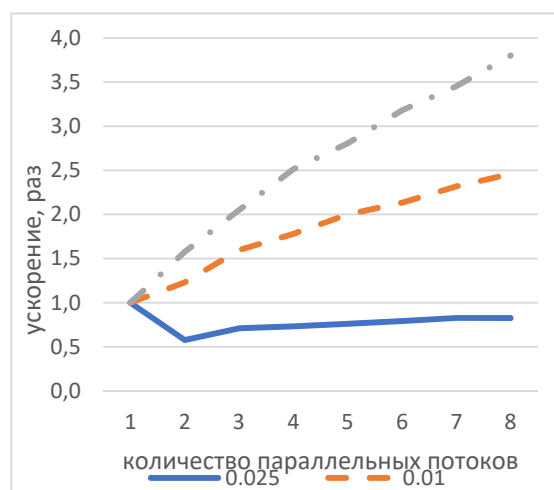


Рис. 2. Ускорение параллельной реализации относительно последовательной

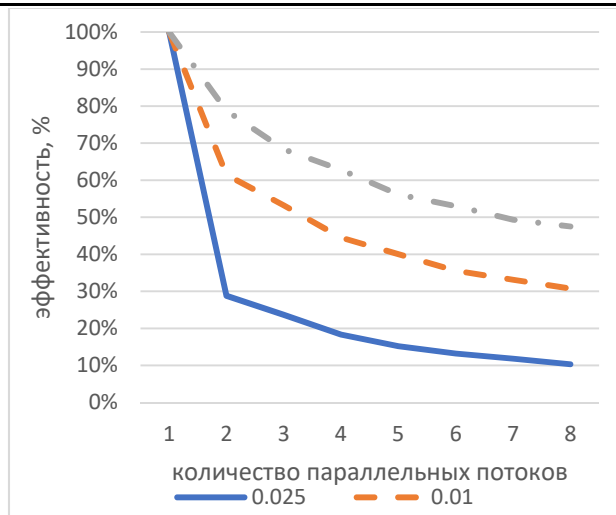


Рис. 3. Эффективность параллельной реализации

Анализ графиков показал, что для сетки 0.025 применение параллельного алгоритма не имеет смысла – это обусловлено большим количеством накладных расходов при создании OpenMP потоков и малым количеством данных. С уменьшением шага сетки до 0.01 ускорение программы составляет 2,5 раза при использовании 8 параллельных потоков. Однако анализ графика эффективности для данной сетки показывает, что использование более 5 потоков является нецелесообразным. При уменьшении шага сетки до 0.005 ускорение составляет 3,8 раза на 8 параллельных потоках. Из графиков видно, что существует тенденция: чем меньше шаг сетки, тем выше и ускорение, и эффективность.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Левин, В. А. Двумерные течения газа при гетерогенном горении твёрдых пористых сред / В. А. Левин, Н. А. Луценко // Доклады академии наук. – 2017. – Т. 476, № 1. – С. 30-34.
2. Lutsenko, N. A. Numerical model of two-dimensional heterogeneous combustion in porous media under natural convection or forced filtration / N. A. Lutsenko // Combustion Theory and Modelling. 2018. V. 22, Issue 2. P. 359-377.
3. Луценко, Н. А. Моделирование процесса извлечения ценных металлов из металлосодержащих сред методом фильтрационного горения / Н. А. Луценко // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. – 2020. – Т. 491, № 4. – С. 85-89.
4. Нигматулин, Р. И. Основы механики гетерогенных сред / Р. И. Нигматулин. – М.: Наука, 1978. – 336 с.