

УДК 519.6,532.546

## OpenMP-версия параллельного алгоритма расчета нестационарных течений газа через пористые объекты с источниками энерговыделения: анализ и применение\*

Н.А. Луценко<sup>1,2</sup>, Г.В. Тарасов<sup>1,2</sup>, К.А. Гырник<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт автоматики и процессов управления Дальневосточное отделение Российской академии наук, ул. Радио, д. 5, Владивосток, 690041

<sup>2</sup>Дальневосточный федеральный университет, ул. Суханова, 8, Владивосток, 690950

E-mails: nickl@inbox.ru (Луценко Н.А.), george@dvo.ru (Тарасов Г.В.), kostochkin92@mail.ru (Гырник К.А.)

**Луценко Н.А., Тарасов Г.В., Гырник К.А.** OpenMP-версия параллельного алгоритма расчета нестационарных течений газа через пористые объекты с источниками энерговыделения: анализ и применение // Сиб. журн. вычисл. математики / РАН. Сиб. отд-ние. — Новосибирск, 2014. — Т. 17, № 3. — С. 229–244.

Исследуется движение газа в поле силы тяжести через пористые объекты с источниками энерговыделения, которые могут возникать в результате природных или техногенных катастроф. Для моделирования нестационарных двумерных течений газа через пористую саморазогревающуюся среду сложной формы разработана OpenMP-версия параллельного алгоритма расчета. Рассмотрена структура последовательного алгоритма и переход от него к OpenMP-версии; проанализированы производительность и эффективность распараллеливания. С помощью разработанного параллельного алгоритма исследованы нестационарные течения газа через осесимметричные пористые саморазогревающиеся объекты с частично закрытым выходным отверстием (верхней крышкой). Проанализировано влияние частичного закрытия выходного отверстия на процесс охлаждения пористых объектов с неравномерным распределением источников тепла.

**Ключевые слова:** параллельные алгоритмы, численное моделирование, пористые среды, газовое охлаждение, тепловыделение.

**Lutsenko N.A., Tarasov G.V., Gyrynik K.A.** An OpenMP version of the parallel algorithm for calculation of unsteady gas flow through porous objects with energy sources: Analysis and Application // Siberian J. Num. Math. / Sib. Branch of Russ. Acad. of Sci. — Novosibirsk, 2014. — Vol. 17, № 3. — P. 229–244.

The gas flows in the gravity field through the porous objects with energy sources, which may originate from the natural or man-caused disasters, have been investigated. An OpenMP version of the parallel algorithm has been developed for the calculation of unsteady 2D gas flows through porous self-heating media of complex subsurface geometries. The structure of the sequential algorithm and the transition from it to the OpenMP version have been described, the performance and efficiency of parallelization have been analyzed. The unsteady gas flows through axisymmetric porous self-heating objects with a partial closure of the object outlet (with a top cover) have been investigated by means of the developed parallel algorithm. The influence of the partial closure of the object outlet on the cooling process of the porous objects with a non-uniform distribution of heat sources has been analyzed.

**Key words:** parallel algorithms, numerical modeling, porous objects, gas cooling, heat release.

---

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение № 14.A18.21.0383), РФФИ (проекты № 12-01-31064-мол-а, № 11-01-98510-р-восток-а), Российской академии наук (программа № 18), ДВО РАН.

## 1. Введение

В результате многих природных и техногенных катастроф часто возникают очаги горения и иного энерговыделения. Такие источники саморазогрева часто появляются в пористых средах, к которым с точки зрения механики можно отнести грунты и горные породы, завалы разрушенных зданий и т. д. Очаги энерговыделения в пористых средах возникают, в частности, при взрывах на атомных и промышленных объектах, а также при подземных взрывах и пожарах, возникающих при добыче полезных ископаемых. Пример аварийного энергоблока Чернобыльской АЭС показал, что единственно приемлемым средством противодействия катастрофе может оказаться воздушное охлаждение подобных объектов [1]. Для исследований в этой области наиболее перспективным видится математическое моделирование с использованием методов механики сплошных гетерогенных сред.

Активные исследования газового охлаждения очагов тепловыделения в пористых средах начались после катастрофы на ЧАЭС, которая продемонстрировала недостаточную изученность процесса движения газа через пористые объекты с выделением тепла. Стационарный режим воздушного охлаждения пористых тепловыделяющих элементов при естественной конвекции исследован в [1], где было показано, что стационарный режим охлаждения подобных объектов существует только при выполнении определенного критерия. Исследования условий существования стационарных режимов охлаждения открытых в атмосферу пористых саморазогревающихся объектов, а также изучение состояний их глобального перегрева были продолжены в [2–7]. Стационарные режимы охлаждения пористых тепловыделяющих элементов принудительно нагнетаемым потоком газа рассмотрены в [8], где показано, что критерий существования стационарного решения в этом случае зависит также от перепада давления газа на входе и выходе из элемента.

Исследования нестационарных режимов газового охлаждения пористых тепловыделяющих объектов были начаты в [9, 10], где был предложен численный метод для моделирования нестационарных одномерных течений газа через пористые элементы с выделением тепла. В [10, 11] было показано, что учет температурной зависимости вязкости газа при моделировании его движения через пористые тепловыделяющие среды изменяет решение не только количественно, но и качественно. В [10] обнаружено явление неограниченного разогрева пористого тепловыделяющего элемента при докритических краевых условиях, приводящее к перегреву и разрушению такого объекта при условиях, удовлетворяющих критерию стационарности. В [12–16] выявлены некоторые особенности одномерных стационарных течений газа через пористые среды с источниками тепла. В [17] предложен численный метод для моделирования плоских нестационарных течений газа через пористые тепловыделяющие элементы, показано влияние формы пористого объекта на процесс его охлаждения. Исследования двумерных (плоских и осесимметричных) течений газа через пористые объекты различной конфигурации с различным распределением источников тепла внутри них были продолжены в [18–20]. В [21] предложен параллельный алгоритм для изучения двумерных нестационарных течений газа через пористые объекты для вычислительных машин с распределенной архитектурой памяти (кластерные системы), с реализацией на MPI, который основан на традиционном методе геометрической декомпозиции расчетной области. Следует отметить, что процесс течения газа через пористые тепловыделяющие среды в значительной степени схож с процессом фильтрационного горения, который в настоящее время изучается достаточно широко. Сходство этих процессов подтверждается тем, что модифицированная модель и численный метод для исследования газового охлаждения пористых тепловыделяющих объектов были успешно использованы при моделировании горения пористых сред [22].

Настоящая работа продолжает исследования нестационарных течений газа через пористые объекты различной пространственной конфигурации с источниками энерговыделения. Для проведения численных экспериментов разработана параллельная программа с использованием технологии OpenMP для многоядерных и многопроцессорных вычислительных систем с общей памятью. В первых двух пунктах коротко обсуждаются математическая модель задачи и исходный последовательный алгоритм. Далее описывается параллельная версия алгоритма, реализованная с помощью OpenMP, обсуждаются ее производительность и эффективность. В последнем пункте с помощью разработанного параллельного алгоритма исследуются нестационарные течения газа через осесимметричные пористые саморазогревающиеся объекты с частично закрытым выходным отверстием (верхней крышкой). Следует заметить, что разработанные вычислительные алгоритмы могут быть использованы для исследования различных технологических процессов в энергетике, металлургии, химической и добывающей промышленности.

## 2. Математическая модель

Рассмотрим неподвижный пористый объект высотой  $H$ , с боков ограниченный непроницаемыми нетеплопроводными стенками, а сверху и снизу открытый.

Все вычисления в настоящей работе выполняются для пористого объекта, верхнее отверстие которого частично закрыто (рис. 1). Пусть в результате протекания некоторых процессов в твердой фазе происходит выделение тепла. В нижнюю часть объекта подается холодный газ, который движется снизу вверх через пористую среду, нагреваясь в результате теплообмена, и вытекает в свободное пространство с заданным давлением.

Модель строится в рамках предположения двух взаимодействующих взаимопроникающих континуумов [23] и включает в себя уравнения энергии, движения, неразрывности и состояния для каждой компоненты (твердой и газообразной). Интенсивность межфазного теплообмена предполагается пропорциональной разности фазовых температур в рассматриваемой точке среды, тепловыделение прямо пропорционально концентрации реагирующего вещества, скорость убывания которой прямо пропорциональна самой концентрации. В уравнениях энергии учитываются теплопроводность твердой компоненты и работа внутренних сил в газе, а теплопроводность газа исключается из рассмотрения вследствие ее малости. Для описания динамики газа используется уравнение сохранения импульса для пористых сред, которое является более корректным, чем классическое уравнение Дарси, и может применяться в большом диапазоне чисел Рейнольдса. Учитывая работы [10, 11], динамическая вязкость газа предполагается зависящей от температуры по формуле Сазерленда. Будем считать, что объем и масса конденсированной фазы изменяются незначительно и этими изменениями можно пренебречь, поэтому, так как твердая среда неподвижна и однородна, то уравнения неразрывности и движения для нее вырождаются. Полагая справедливость уравнения состояния совершенного газа, запишем систему

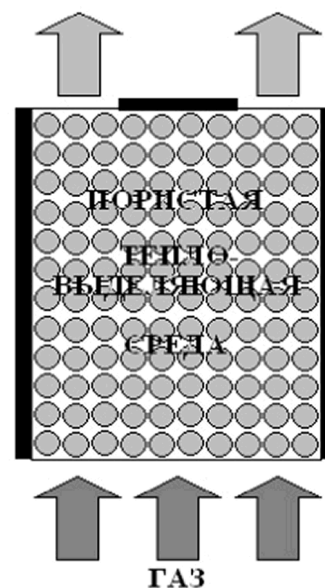


Рис. 1. Пористый тепловыделяющий объект

уравнений, моделирующую нестационарные течения газа через пористые тепловыделяющие объекты:

$$\begin{aligned}
 (1-a)\rho_c c_c \frac{\partial T}{\partial t} &= -\alpha(T-T_g) + Q_0(1-a)\exp(-k_2 t) + (1-a)\lambda\Delta T, \\
 a\rho c_p \left( \frac{\partial T_g}{\partial t} + (\mathbf{v}_g \cdot \nabla) T_g \right) &= \alpha(T-T_g) + a \left( \frac{\partial p}{\partial t} + (\mathbf{v}_g \cdot \nabla) p \right) + a^2 \frac{\mu}{k_1} \mathbf{v}_g^2, \\
 \rho(1+\chi(1-a)) \left( \frac{\partial \mathbf{v}_g}{\partial t} + (\mathbf{v}_g \cdot \nabla) \mathbf{v}_g \right) &= -\nabla p + \rho \mathbf{g} - a \frac{\mu}{k_1} \mathbf{v}_g, \\
 a \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (a\rho \mathbf{v}_g) &= 0, \quad p = \rho R T_g, \quad \mu = c_{s1} \frac{T_g^{1.5}}{c_{s2} + T_g}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь и далее  $a$  — пористость,  $c_c$  — теплоемкость конденсированной фазы,  $c_p$  — теплоемкость газа при постоянном давлении,  $c_{s1}$  и  $c_{s2}$  — константы в формуле Сазерленда,  $\mathbf{g}$  — ускорение силы тяжести,  $k_1$  — коэффициент проницаемости конденсированной фазы,  $k_2$  — коэффициент, определяющий уменьшение тепловыделения,  $p$  — давление газа,  $Q_0$  — константа, определяющая интенсивность тепловыделения,  $R$  — газовая постоянная,  $t$  — время,  $T$  — температура конденсированной фазы,  $T_g$  — температура газа,  $\mathbf{v}_g$  — скорость газа,  $\alpha$  — константа, определяющая интенсивность межфазного теплообмена,  $\lambda$  — теплопроводность конденсированной фазы,  $\mu$  — динамическая вязкость газа,  $\rho$  — плотность газа,  $\rho_c$  — плотность конденсированной фазы,  $\chi$  — коэффициент, учитывающий инерционное взаимодействие фаз при их ускоренном относительном движении [23].

Введем обозначение:  $\mathbf{u} = a\mathbf{v}_g$  — скорость фильтрации газа. При исследовании плоских двумерных течений в декартовой системе координат условимся обозначать индексом 1 горизонтальную координату, а индексом 2 — вертикальную. При наличии осевой симметрии удобно перейти к цилиндрическим координатам, тогда все параметры состояния трехмерной модели будут зависеть только от двух пространственных координат. В этом случае условимся обозначать индексом 1 радиальную координату, а индексом 2 — аксиальную (осевую).

На входе в пористый объект известны температура газа и давление. На выходе известно давление, так как истечение газа происходит в открытое пространство. Известны также условия теплообмена на входе и выходе из пористого объекта и на ограничивающих непроницаемых стенах. Отличительной особенностью модели является то, что расход и скорость фильтрации газа на входе в пористый объект неизвестны и должны определяться при решении задачи. Таким образом, краевые условия для системы (1) имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 p|_{x_2=0} &= p_0(t), & T_g|_{x_2=0} &= T_{g0}(t), & \lambda \frac{\partial T}{\partial x_2} \Big|_{x_2=0} &= \beta(T|_{x_2=0} - T_{g0}), \\
 u_1|_{x_2=0} &= 0, & p|_{x_2=H} &= p_h, & \lambda \frac{\partial T}{\partial x_2} \Big|_{x_2=H} &= \beta(T_g|_{x_2=H} - T|_{x_2=H}), \\
 \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{x \in G} &= 0, & \frac{\partial T_g}{\partial n} \Big|_{x \in G} &= 0, & u_n|_{x \in G} &= 0.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Здесь  $G$  — поверхность боковых стен,  $n$  — нормаль к поверхности боковых стен,  $\beta$  — коэффициент теплоотдачи.

Для решения системы (1) необходимо также задать значения искомых величин в начальный момент времени.

### 3. Последовательный вычислительный алгоритм

Система уравнений (1), моделирующая двумерное нестационарное движение газа через пористый тепловыделяющий объект, является нелинейной смешанной гиперболически-параболической системой уравнений и в общем случае не может быть решена аналитически. Для исследования двумерных нестационарных режимов охлаждения пористого объекта с выделением тепла при известном перепаде давлений на входе и на выходе из объекта разработан оригинальный численный метод, основанный на комбинации явных и неявных конечно-разностных схем [17, 19]. Уравнения энергии и сохранения импульса преобразуются в явные конечно-разностные уравнения, из которых определяются температура газа, температура твердой среды и компоненты скорости фильтрации газа. Уравнение неразрывности преобразуется в неявное конечно-разностное уравнение, из которого с учетом уравнения состояния совершенного газа определяется давление газа. Плотность газа определяется из уравнения состояния совершенного газа.

Последовательный алгоритм расчета состоит из трех основных этапов: инициализации, вычисления и завершения. Описание характеристик пористого объекта осуществляется в шести трехмерных массивах, в которых содержатся значения температуры газа, температуры твердой фазы, давления газа, плотности газа, вертикальной (или осевой) и горизонтальной (или радиальной) скоростей газа. Первые две размерности каждого массива отвечают за размеры сетки (координаты  $x_1$  и  $x_2$ ), а третья — за количество временных слоев, необходимых для выполнения алгоритма. При исполнении этапа инициализации из файлов, подготовленных предварительно пользователем, загружаются данные, соответствующие начальному состоянию пористого объекта. Затем выполняется вычислительный этап, реализующий цикл по времени, в котором значения на текущем временном слое вычисляются с использованием значений предыдущего временного слоя (таким образом, третья размерность используемых массивов всегда равна 2). Алгоритм вычисления характеристик пористого объекта на каждом шаге по времени выглядит следующим образом: индекс координаты  $x_1$  фиксируется; последовательно изменяя индекс координаты  $x_2$ , решается система четырех явных уравнений, из которых определяются скорости газа, температура газа и температура твердой фазы; затем, используя алгоритм прогонки, решается неявное уравнение, из которого определяется давление газа, и вслед за этим тривиально вычисляется плотность газа; после этого изменяется индекс координаты  $x_1$  и процесс повторяется. После расчета всех внутренних значений на данном временном слое вычисляются краевые условия. Затем происходит переход либо к следующему временному слою, либо к этапу завершения, на котором реализуется запись результатов вычислений в соответствующие файлы.

Следует заметить, что для различных координат  $x_1$  используемые алгоритмы прогонки могут отличаться в зависимости от проницаемости соответствующей верхней части пористого объекта: если верхняя часть объекта открыта в атмосферу, то применяется обычная прогонка, а если верхняя часть закрыта, то обычную прогонку применять нет возможности, так как в этом случае неизвестно значение давления на верхней границе. Однако в этом случае можно использовать измененный алгоритм прогонки: необходимо начинать вычисления с верхней границы ( $x_2 = H$ ), выбрав вспомогательные для прогонки константы на этой верхней границе не из условия заданного давления, а из условия равенства нулю производной давления по нормали к поверхности верхней границы. Обратим также внимание, что в неявном уравнении для определения давления кроме точек на предыдущем временном слое используются только три точки на текущем временном слое с одинаковой координатой  $x_2$ , так как конечно-разностное представление производной по  $x_2$  здесь записывается на текущем временном слое, а производной по  $x_1$  — на

предыдущем слое. Такой подход позволяет использовать скалярную прогонку даже для двумерных расчетов.

Отметим, что общая сложность вычислительного алгоритма оценивается как  $O(\frac{1}{h^4})$ , где  $h$  — шаг по пространству, при этом шаг по времени  $\tau = rh^2$ . Однако эмпирическим путем было выяснено, что с уменьшением шага по пространству  $h$  обычно  $r$  можно увеличивать. Таким образом, сложность алгоритма может достигать  $O(\frac{1}{h^3})$ .

#### 4. OpenMP-реализация параллельного алгоритма

В основу параллельного алгоритма положен *принцип геометрической декомпозиции*, который состоит в логическом разбиении области расчета на независимые подобласти,

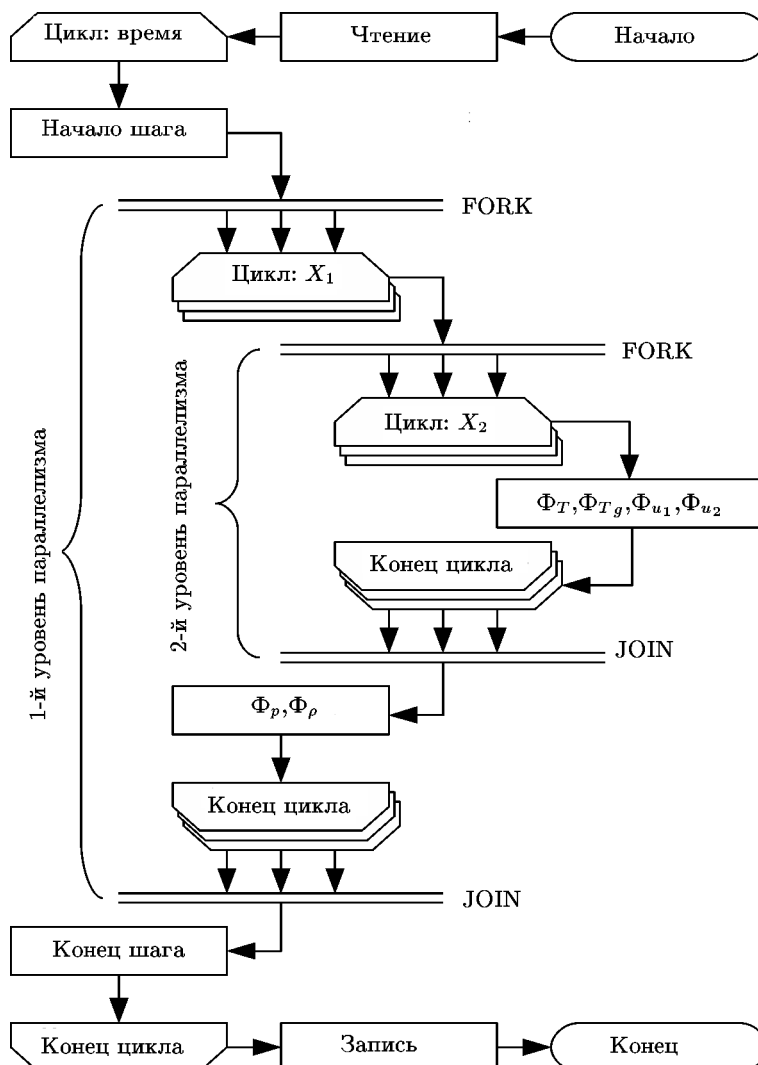


Рис. 2. Параллельный алгоритм решения задачи

вычисления в которых могут выполняться параллельно. Анализ структур данных и вычислительных выражений последовательного алгоритма позволил обнаружить два основных блока кода, распараллеливание которых существенно ускоряет получение конеч-

ного результата. На рис. 2 показана блок-схема параллельного алгоритма<sup>1</sup>. Прямоугольниками обозначены последовательные действия, связанные с чтением или записью входных и выходных данных, выполнением конечных вычислений. Симметричные блоки в форме шестиугольников отображают границы циклов. Параллельные прямые отображают места разбиения (FORK) и слияния (JOIN) последовательной и параллельной частей алгоритма. Множественные стрелки показывают, что с данного места алгоритма идет параллельный поток управления. Например, для цикла по координате  $x_1$  это означает, что одновременно будут идти вычисления сразу по нескольким значениям координаты.

Данный параллельный алгоритм был получен из последовательного алгоритма введением параллельных операций (FORK/JOIN). Блок-схему последовательного алгоритма нетрудно представить, достаточно убрать символы и обозначения параллельных операций и связать соответствующие блоки одинарной стрелкой, представляющей один поток управления.

Символами  $\Phi$  помечены блоки вычислений соответствующих физических величин ( $\Phi_T$  — температура твердой фазы,  $\Phi_{T_g}$  — температура газа,  $\Phi_p$  — давление,  $\Phi_\rho$  — плотность,  $\Phi_{u_1}$  и  $\Phi_{u_2}$  — горизонтальная и вертикальная скорость фильтрации газа).

Рассмотрим исходный последовательный алгоритм и покажем, что введение параллельных операций, с одной стороны, не нарушает общей логики вычислений, с другой стороны, ускоряет время получения конечного результата. Распишем каждое  $\Phi$ -выражение в виде функциональной зависимости результата от исходных значений в некоторой точке расчетной области. Данные зависимости построены на основе ручного анализа кода последовательного алгоритма:

$$\begin{aligned} T(t + \Delta t, x_1, x_2) &= \Phi_T([T, T_g](t, x_1^{-1}, x_1, x_1^{+1}, x_2^{-1}, x_2, x_2^{+1})), \\ T_g(t + \Delta t, x_1, x_2) &= \Phi_{T_g}([T, T_g, \rho, p, u_1, u_2](t, x_1^{-2}, x_1^{-1}, x_1, x_1^{+1}, x_1^{+2}, x_2^{-2}, x_2^{-1}, x_2, x_2^{+1}, x_2^{+2}), \\ &\quad p(t - \Delta t, x_1, x_2)), \\ u_1(t + \Delta t, x_1, x_2) &= \Phi_{u_1}([p, \rho, u_1, u_2](t, x_1^{-2}, x_1^{-1}, x_1, x_1^{+1}, x_1^{+2}, x_2^{-2}, x_2^{-1}, x_2, x_2^{+1}, x_2^{+2})), \\ u_2(t + \Delta t, x_1, x_2) &= \Phi_{u_2}([p, \rho, u_1, u_2](t, x_1^{-2}, x_1^{-1}, x_1, x_1^{+1}, x_1^{+2}, x_2^{-2}, x_2^{-1}, x_2, x_2^{+1}, x_2^{+2})), \\ p(t + \Delta t, x_1, x_2) &= \Phi_p([T_g, p, u_2](t + \Delta t, x_1, x_2^{-1}), [T_g, u_2](t + \Delta t, x_1, x_2^{+1}), \\ &\quad [T_g, p, \rho, u_1, u_2](t, x_1^{-2}, x_1^{-1}, x_1, x_1^{+1}, x_1^{+2}, x_2^{-2}, x_2^{-1}, x_2, x_2^{+1}, x_2^{+2})), \\ \rho(t + \Delta t, x_1, x_2) &= \Phi_\rho([T_g, p](t + \Delta t, x_1, x_2)). \end{aligned}$$

Запись вида  $A(t, x_1, x_2)$  обозначает значение физической величины  $A$  в ячейке области расчета с координатами  $(x_1, x_2)$  в некоторый момент времени  $t$ . Для краткости сгруппируем квадратными скобками те величины, которые соответствуют одному и тому же шагу по времени. Так же сгруппируем и значения координат. Отметим, что эту запись не следует трактовать как строгую математическую формулу. Мы лишь хотим отобразить зависимость одних ячеек расчетной области от других. Шаг  $t + \Delta t$  обозначает новый шаг по времени. Запись вида  $x_i^j$  обозначает значение координаты расчетной области со смещением вдоль оси на  $j$  единиц относительно некоторой текущей координаты, обозначенной  $x_i$ .

Из соотношений видно:

1. Расчет значений величин  $T$ ,  $T_g$ ,  $u_1$  и  $u_2$  нового шага по времени зависит от значений других величин только на предыдущем шаге по времени; исключение составляет зависимость  $T_g(t + \Delta t, x_1, x_2) = \Phi_{T_g}$ , где показано, что для вычисления значения

<sup>1</sup> в соответствии с нотацией ГОСТ 19.701-90 (межд. ISO 5807:1985)

температуры газа на новом шаге по времени требуется знать значение давления не только на предыдущем, но также и на шаге, предшествующему предыдущему; отметим, что в алгоритме предусмотрена инициализация давления на начальном этапе сразу для двух шагов по времени;

2. Расчет значений давления  $p$  имеет сложную взаимную зависимость  $p(t + \Delta t, x_1, x_2) = \Phi_p$  по координате  $x_2$ ; также между значениями  $p$  и  $\rho$  существует взаимная зависимость  $\rho(t + \Delta t, x_1, x_2) = \Phi_\rho$ , которая не позволяет посчитать  $\rho$  раньше  $p$  (это очевидно и с физической точки зрения);
3. Во всех представленных соотношениях отсутствует взаимная зависимость по координате  $x_1$  на одном шаге по времени (текущем или предыдущем).

Приведенные результаты анализа исходного последовательного алгоритма позволяют ввести два уровня параллелизма в последовательный алгоритм и реализовать параллельную программу. Первый уровень параллелизма основан на независимости расчета всех физических величин по координате  $x_1$  (3-й пункт анализа). Таким образом, цикл, пробегающий расчетную область по  $x_1$ , может быть полностью распараллелен на отдельные итерации. Вторым уровнем параллелизма основан на 1-м пункте анализа. Таким образом, цикл, пробегающий расчетную область по  $x_2$ , также может быть полностью распараллелен на отдельные итерации. Цикл по времени, а также блок расчета давления и плотности, не может быть распараллелен по понятным причинам. Для первого существует очевидная зависимость по времени (новый шаг зависит от предыдущего и т. д.). Для второго существует зависимость, описанная во 2-м пункте анализа.

Кратко опишем реализацию описанного алгоритма с помощью технологии OpenMP. Основу этой технологии составляют две базовые операции: FORK и JOIN, выполняющие разбиение единичного потока управления на несколько параллельных потоков и, соответственно, обратное соединение нескольких параллельных потоков в один. Таким образом, общий поток управления программы можно описать как последовательный с наличием параллельных блоков, начинающихся операцией FORK, заканчивающихся операцией JOIN. Использование этих операций в коде программы сводится к вставке директив специального вида, указывающих компилятору начало и конец параллельного блока. Для данной задачи использовалась директива `parallel for`, отвечающая за распараллеливание циклов. Доступ к данным разграничивается дополнительными операторами директивы: `private` и `shared`; `private` определяет локальные данные каждого потока управления, `shared` — общие данные между всеми потоками. К локальным данным относятся индексные переменные координат  $x_1$  и  $x_2$ , которые должны быть у каждого параллельного потока свои. Общими данными являются расчетные массивы (шесть массивов и несколько дополнительных) и данные о шаге по времени: текущее модельное время, индекс текущего и следующего шагов по времени. В код последовательной программы были внесены четыре основные правки: помечен блок кода цикла по  $x_1$ ; помечен блок кода цикла по  $x_2$ ; вставлен вызов функции `omp_set_nested`, активизирующей режим вложенного параллелизма; модифицировано представление расчетных данных задачи в памяти вычислителя.

Одним из главных факторов, влияющих на производительность параллельной вычислительной программы, является эффективное использование оперативной памяти. Речь идет не столько об экономии памяти, сколько об организации правильного обращения к ней со стороны множества параллельных потоков. Чтение или запись данных в оперативную память в современных процессорах никогда не происходит напрямую, а используется механизм кэш-памяти — механизм промежуточной буферизации некоторого подмножества страниц оперативной памяти, обладающий более высоким (в разы



и более) показателем производительности. Чтобы механизм промежуточной буферизации работал эффективно, требуется соблюдать *принцип локальности данных*. Суть этого принципа состоит в том, чтобы добиться максимального попадания в кэш данных, требующихся на каждом шаге вычислительного алгоритма. Для этого данные должны быть расположены как можно “ближе” друг к другу: по соседним адресам или в пределах нескольких страниц при размещении в оперативной памяти.

При разработке параллельной программы расчета состояния пористого объекта, в соответствии с принципом локальности данных, в исходный последовательный вариант программы было внесено следующее существенное изменение. Вместо исходных шести массивов для хранения данных пористого объекта был создан один массив размерности 2, соответствующий размеру расчетной сетки. Каждая ячейка этого большого массива, в свою очередь, является одномерным массивом, где по соответствующим индексам хранятся температура газа, температура твердой фазы и все остальные характеристики как на новом временном слое, так и на предыдущем. Также в этом массиве было зарезервировано несколько ячеек для вспомогательных величин, используемых в расчетных формулах. Описанное преобразование в технических руководствах по оптимизации часто обозначают заменой формы представления данных в виде структуры массивов SOA (Structure of Arrays) на форму представления в виде массива структур AOS (Array of Structures). Применение той или иной формы представления зависит от задачи. Для нашей вычислительной задачи выбрана вторая форма представления, так как она позволяет расположить данные задачи в оперативной памяти максимально близко друг к другу в соответствии с вычислительными формулами алгоритма.

## 5. Анализ производительности и эффективности параллельной программы

Тестирование производительности и эффективности разработанной параллельной программы производилось на двух узлах вычислительного кластера, которые выделялись монополюбно для проведения расчетов. Первый узел имеет 2 процессора Intel Xeon L5609 (частота 1.87 ГГц) и 32 Гбайта оперативной памяти. Каждый процессор имеет по 4 вычислительных ядра. Таким образом, первый узел может выполнять до 8 параллельных потоков управления. Второй узел — 4 процессора AMD Opteron 6164HE (частота 1.7 ГГц) и 64 Гбайта оперативной памяти. Каждый процессор имеет по 12 вычислительных ядер. Таким образом, второй узел может выполнять до 48 параллельных потоков управления. Все процессоры обладают трехуровневым кэшем. Кэш-память 1-го и 2-го уровней имеется в каждом вычислительном ядре и обслуживает запросы на доступ к оперативной памяти с этого ядра. Размеры кэш-памяти составляют L1=64 килобайта и L2=256 килобайт для процессоров Intel и L1=128 килобайт и L2=512 килобайт для процессоров AMD. Кэш-память 3-го уровня является общей для каждого процессора в целом и является промежуточным буфером между оперативной памятью узла и кэшем 2-го уровня ядра. Размер кэш-памяти 3-го уровня у обоих процессоров составляет по 12 Мбайт. Также отметим, что используемые для расчетов узлы имеют архитектуру NUMA (несимметричный доступ к памяти). Каждый процессор имеет прямой доступ только к части физической памяти узла. Остальная часть памяти доступна через вспомогательные обращения к контроллеру памяти соседнего процессора. Связь между процессорами организована на физическом уровне с помощью технологий Quick Path Interconnect (для Intel) и HyperTransport (для AMD). Весь механизм связи процессоров и их доступ к оперативной памяти реализован “в железе” и прикладным программистам напрямую

недоступен. Также отметим, что авторы не использовали никакие дополнительные инструменты организации распределенной общей памяти. Все тесты производились только в рамках описанных узлов.

Результаты тестирования приведены на рис. 3 (а — работа программы на процессорах Intel, б — AMD). Тестирование проводилось на конфигурациях пористого объекта с величиной шага 0.025, 0.01 и 0.0025 единиц, что соответствует размерам сетки расчетной области (с учетом фиктивных точек)  $43 \times 43$ ,  $103 \times 103$  и  $403 \times 403$  ячеек (на рисунках — квадраты, кружки и треугольники соответственно).

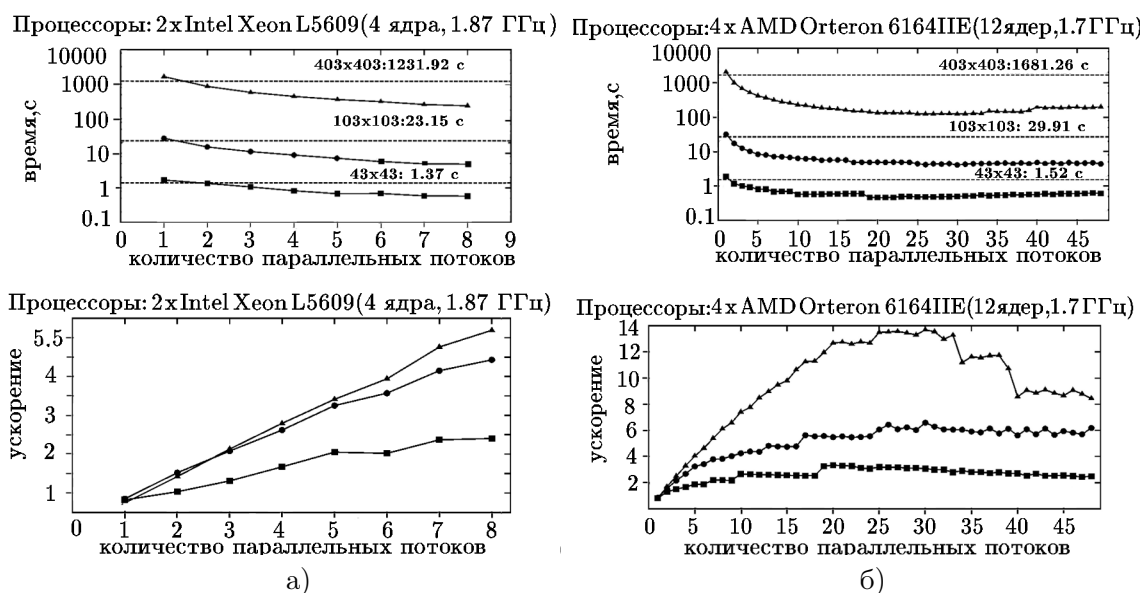


Рис. 3. Графики времени работы и ускорения параллельной программы

Верхние графики отражают зависимость времени работы программы от количества параллельных потоков программы. Тестирование проводилось на задаче моделирования процессов в пористом объекте в течение 20 модельных секунд, что соответствует 80000, 200000 и 800000 итерациям цикла по времени. Пунктирной горизонтальной чертой показан результат работы последовательного алгоритма при тех же условиях запуска и входных данных. На оси абсцисс значение «1» соответствует OpenMP-версии программы, но запущенной в работу с одним потоком. Естественно такая версия будет уступать последовательной программе по производительности, поскольку будет тратить время на создание и обслуживание одного потока в рамках параллельной программы. Обращаем внимание, что шкала оси ординат является логарифмической.

Нижние графики отражают зависимость ускорения работы программы от количества параллельных потоков. В лучшем случае для процессоров Intel получено ускорение почти в 5 раз (при 8 потоках и 8 ядрах соответственно), для процессоров AMD получено ускорение почти в 14 раз (при 30 потоках и 48 ядрах соответственно). Немонотонный характер кривых коэффициента ускорения для процессора AMD вызван неравномерностью доступа к кэш-памяти вычислительного узла параллельных потоков программы при некотором их количестве. Особенно явно такие скачки видны на больших сетках ( $403 \times 403$  ячейки). При этом в ряде случаев увеличение числа потоков приводило к увеличению производительности, что свидетельствует об удачном попадании данных потоков

в кэш-память. В остальных случаях увеличение числа потоков уже не давало должного эффекта, а, наоборот, приводило к скачкообразному падению производительности в результате неэффективного доступа к кэш-памяти вычислительного узла.

Несмотря на достигнутое внушительное ускорение следует отметить, что эффективность работы программы следует оценивать по-разному для разных архитектур узлов. Так, для процессоров Intel не был достигнут порог масштабируемости задачи (по количеству потоков). Все графики ускорения для всех размерностей задачи имеют условно линейный вид. Максимальная эффективность задачи на Intel составила порядка 60% (ускорение разделить на количество доступных ядер процессора). При этом максимальная эффективность на AMD не превысила порога в 30%. К сожалению, авторы не располагали соответствующей техникой, чтобы протестировать порог масштабируемости задачи для процессоров Intel с большим общим числом ядер (16 или 24). Однако можно сказать, что если сравнивать работу программы на AMD и Intel, то получены примерно одинаковые результаты по ускорению (до 8 параллельных потоков). AMD даже обгоняет Intel для больших сеток почти на 10%. При этом слабая эффективность AMD вызвана лишь тем, что на узлах доступно всего 48 ядер, которые для случая 8 потоков просто не используются. Таким образом, можно сделать вывод, что если при проведении вычислительных экспериментов фактор скорости получения результата играет решающую роль, то, безусловно, применение вычислительных узлов с большим количеством ядер является более выгодным, особенно для задач большой размерности.

Также следует отметить, что результаты производительности данной работы почти в двое превосходят результаты, полученные в работе [21], где был реализован параллельный алгоритм с использованием MPI для систем с распределенной архитектурой памяти. Такое ускорение объясняется, с одной стороны, использованием более новой техники, с другой стороны, задержки по времени на взаимодействие через общую память существенно меньше задержек по времени на взаимодействие по сети (для распределенной памяти).

## 6. Газовое охлаждение пористых саморазогревающихся объектов с частично закрытым выходным отверстием

С помощью разработанной программы исследован процесс течения газа через осесимметричные пористые саморазогревающиеся объекты с частично закрытым выходным отверстием (верхней крышкой), пример такого объекта схематически изображен на рис. 1. Исследование влияния частичного закрытия выходного отверстия на процесс охлаждения пористых объектов с неравномерным распределением источников тепла, которому посвящен настоящий пункт, проводится следующим образом. Решается осесимметричная нестационарная задача о включении принудительной фильтрации в момент начала тепловыделения в твердой фазе для объектов с различными параметрами верхней крышки и тепловыделяющей зоны. В настоящей работе ограничимся рассмотрением объектов с одинаковыми размерами высоты  $H$  и диаметра  $L$  (т. е. при  $L = H$ ), очаг тепловыделения в которых имеет цилиндрическую форму и симметричен относительно вертикальной оси, проходящей через центр пористого объекта. При исследовании будем менять диаметр верхней крышки  $L_1$ , диаметр тепловыделяющей зоны  $L_2$  и ее высоту  $H_1$ , при этом расстояние от тепловыделяющей зоны до входа в тепловыделяющий объект принимаем равным 0. Начально-краевые условия и параметры задачи выбираются таким образом, чтобы процесс охлаждения со временем перешел в устойчивое стационарное состояние (точнее — в квазистационарное, так как интенсивность тепловыделения со временем

медленно убывает из-за “выгорания” реагирующего вещества, что приводит к медленно-му изменению всех остальных параметров). Далее проводится сравнение температуры твердой среды в максимально горячей зоне.

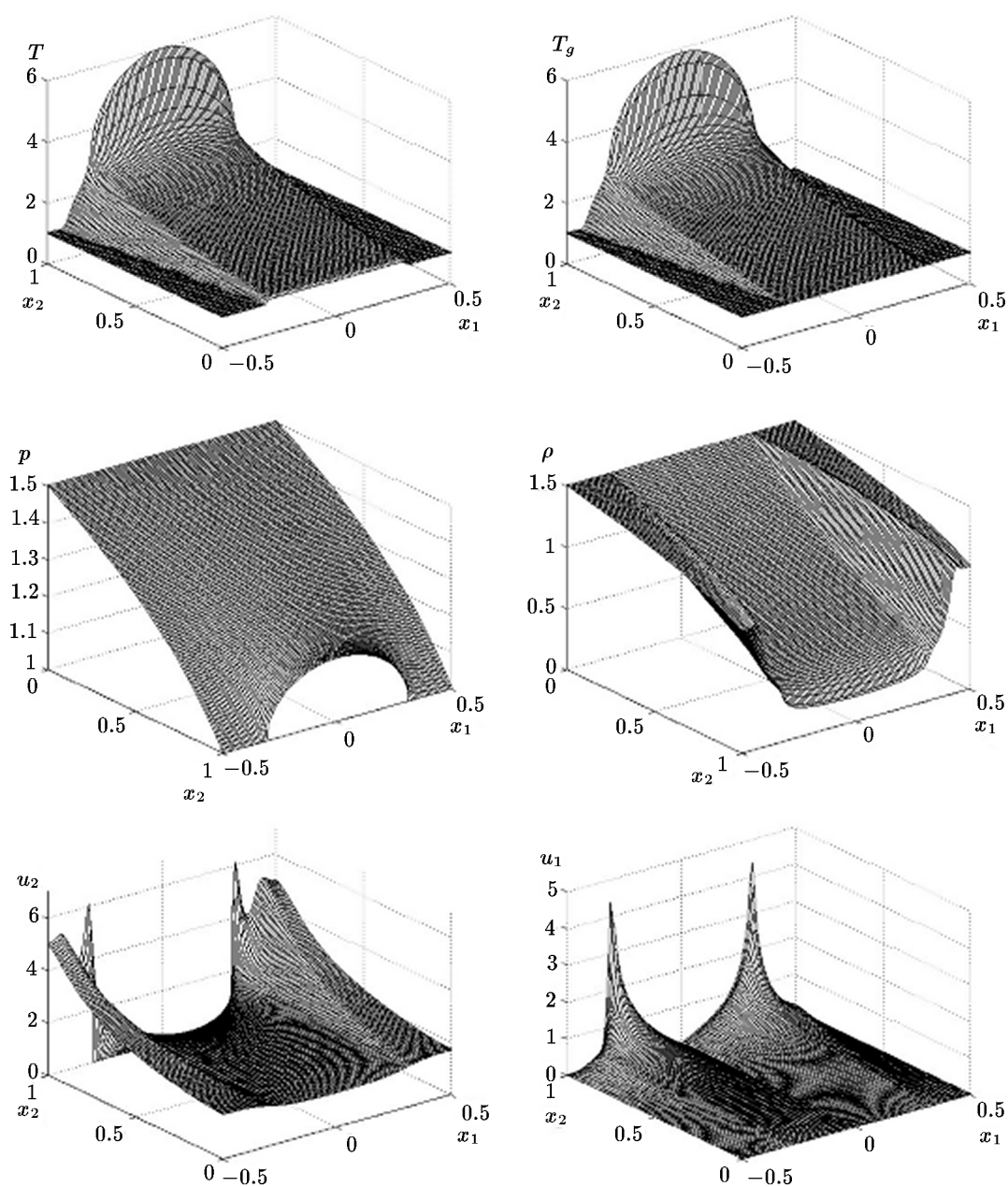
Рассмотрим задачу о включении принудительной фильтрации в момент начала тепловыделения в твердой среде. Тепловыделение в твердой фазе до начального момента времени отсутствует, давление на входе в объект и на выходе из него соответствует атмосферному давлению на заданных высотах, следовательно, движения воздуха в объекте не происходит. В начальный момент времени начинается тепловыделение в твердой фазе и одновременно происходит быстрый рост давления газа на входе в объект. Далее, если не оговорено особо, будем рассматривать систему (1) со следующими параметрами:

$$\begin{aligned} \rho_c &= 2.2 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, & c_c &= 9.2 \cdot 10^2 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, & c_p &= 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, & \alpha &= 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К} \cdot \text{с}}, \\ c_{s1} &= 1.458 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с} \cdot \sqrt{\text{К}}}, & c_{s2} &= 110.4 \text{ К}, & k_1 &= 10^{-8} \text{ м}^2, & Q_0 &= 5 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{с}}, \\ \lambda &= 1.2 \frac{\text{Дж}}{\text{м} \cdot \text{К} \cdot \text{с}}, & g &= 9.8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}, & k_2 &= 10^{-7} \frac{1}{\text{с}}, & \beta &= 10 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{с}}. \end{aligned}$$

Решение системы (1) проводилось в безразмерном виде, при этом безразмерные переменные вводились следующим образом:  $\tilde{x} = x/H$ ,  $\tilde{t} = t/t_*$ ,  $\tilde{u} = \mathbf{u}/u_*$ ,  $\tilde{p} = p/p_*$ ,  $\tilde{\rho} = \rho/\rho_*$ ,  $\tilde{T} = T/T_*$ ,  $\tilde{T}_g = T_g/T_*$ , где  $H = 10$  м,  $t_* = 1$  с,  $u_* = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ,  $T_* = 300$  К,  $p_* = 10^5$  Па,  $\rho_* = 1.2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ . Далее везде тильда опущена, так как использованы только безразмерные переменные.

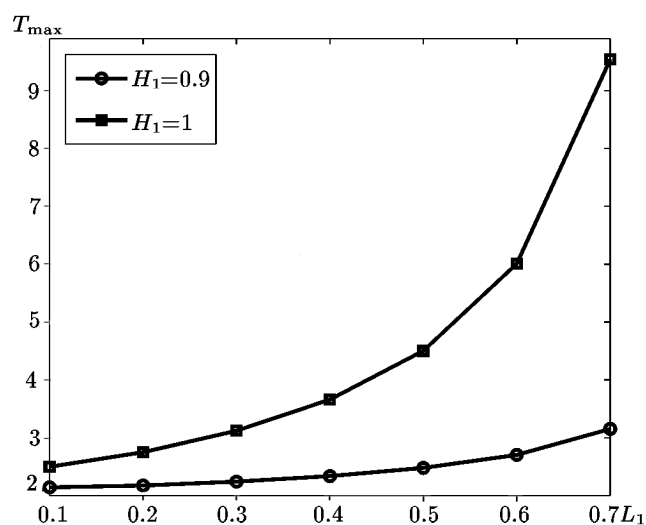
В рассмотренной задаче положено, что давление на входе в объект быстро возрастет до 1.5 и после достижения этого значения остается постоянным. Тогда краевые условия получаются из (2) при следующих значениях:  $p_0 = 1.5$ ,  $T_{g0} = 1$ ,  $p_h = 1$ .

На рис. 4 приведен пример распределения температуры твердой среды, температуры газа, давления, плотности газа, аксиальной и радиальной скорости фильтрации газа по пористому объекту при диаметре тепловыделяющей зоны  $L_2 = 0.6$  и ее высоте  $H_1 = 1$  в случае, когда диаметр верхней крышки  $L_1 = L_2 = 0.6$  через  $t = 86400$  (это соответствует 24 часам размерного времени) после начала процесса. К этому времени квазистационарный режим охлаждения уже практически установился. Для лучшей визуализации графики давления и плотности газа развернуты на  $180^\circ$ . Как видно из рисунка, температура как твердой фазы, так и газа значительно изменяются только в зоне тепловыделения и ее окрестности. Температуры газа и конденсированной фазы растут с высотой, а плотность газа и давление при этом снижаются. Газ, встречающий на своем пути верхнюю крышку, стремится обогнуть ее, поэтому в этом месте увеличивается давление. Вблизи края верхней крышки наблюдаются пиковые величины радиальной и осевой скоростей фильтрации. Они обусловлены тем, что потоки газа, огибающие верхнюю крышку, не встречают сопротивления, поэтому ускоряются. Осевая скорость фильтрации имеет еще один небольшой пик, обусловленный влиянием нагревания объекта: в центральной части объекта часть потока газа, встречающая тепловыделяющую зону на своем пути, стремится обогнуть ее — в связи с этим осевая составляющая скорости фильтрации в зоне тепловыделения ниже, чем по краям объекта на той же высоте, и на выходе из объекта недалеко от границы тепловыделяющей зоны возникает ее небольшой пик. Таким образом, течение газа внутри пористого объекта является довольно сложным. Наибольший нагрев происходит в непосредственной близости от крышки, так как в этом месте газ течет медленно. Крышка на выходе из пористого объекта значительно снижает его охлаждение.



**Рис. 4.** Распределение температуры твердой среды, температуры газа, давления и плотности газа, аксиальной и радиальной скорости фильтрации газа по пористому тепловыделяющему объекту

Когда размер верхней крышки увеличивается, отток тепла от ее окрестности уменьшается, а температура в этой области значительно возрастает. Влияние размера верхней крышки на процесс охлаждения пористых тепловыделяющих объектов демонстрирует рис. 5, на котором показана температура твердой среды в максимально горячей зоне для разного диаметра верхней крышки  $L_1$  при различных высотах тепловыделяющей зоны  $H_1$ , когда диаметр зоны тепловыделения  $L_2$  равен диаметру верхней крышки  $L_1$ .



**Рис. 5.** Зависимость температуры твердой среды в максимально разогретой области от диаметра верхней крышки  $L_1$  при различных высотах тепловыделяющей зоны  $H_1$  и при диаметре тепловыделяющей зоны  $L_2=L_1$

зоны тепловыделения меньше, чем высота пористого объекта, нагрев пористого объекта также нелинейно возрастает с увеличением размера верхней крышки, но этот рост оказывается не таким сильным. Когда в непосредственной близости от верхней крышки, где газ движется очень медленно, выделения тепла не происходит, общее охлаждение пористого объекта оказывается значительно лучше. Таким образом, если диаметр зоны тепловыделения и верхней крышки совпадают, то при высоте тепловыделяющей зоны, равной высоте пористого объекта, закрытие зоны тепловыделения верхней крышкой допускается только тогда, когда размер тепловыделяющей зоны не очень велик. При высоте зоны тепловыделения меньше, чем высота пористого объекта, закрытие тепловыделяющей зоны верхней крышкой допускается при существенно большем диаметре этой зоны.

Проведенные расчеты также показали, что если диаметр верхней крышки  $L_1$  не равен диаметру зоны тепловыделения  $L_2$ , то разогрев пористого объекта слабо зависит от размера тепловыделяющей зоны при фиксированной верхней крышке. А при фиксированном диаметре зоны тепловыделения с увеличением размера верхней крышки нагрев сильно растет. Таким образом, частичное закрытие выходного отверстия крышкой большого размера не допускается даже при тепловыделяющей зоне малого диаметра, если высота этой зоны равна высоте пористого объекта.

Следует заметить, что распараллеливание алгоритма и организация расчетов на многопроцессорных компьютерах позволили значительно сократить время вычисления для двумерных задач газового охлаждения пористых тепловыделяющих объектов сложной конфигурации.

## Заключение

Для исследования динамических процессов в пористых саморазогревающихся объектах сложной формы разработана OpenMP-версия параллельного алгоритма расчета. Рассмотрена структура последовательного алгоритма и переход от него к OpenMP-версии; проанализированы производительность и эффективность распараллеливания.

Как видно из рисунка, нагрев пористого объекта нелинейно возрастает с увеличением размера верхней крышки. Медленное движение газа в непосредственной близости от верхней крышки приводит к ухудшению охлаждения в этом месте. Плохое охлаждение в непосредственной близости от верхней крышки с увеличением ее размера может привести к локальному перегреву, локальному плавлению и разрушению объекта, когда температура в остальной части объекта не является высокой. Влияние размера верхней крышки на процесс охлаждения сильнее всего проявляется, когда высота тепловыделяющей зоны равна высоте пористого объекта. Если высота

Посредством вычислительного эксперимента исследованы нестационарные течения газа через осесимметричные пористые саморазогревающиеся объекты с частично закрытым выходным отверстием (верхней крышкой) при различных диаметрах верхней крышки и тепловыделяющей зоны. Показано, что течение газа внутри таких пористых объектов носит сложный характер. Обнаружено, что нагрев пористого объекта нелинейно возрастает с увеличением размера верхней крышки как при фиксированном размере зоны тепловыделения, так и в случае равенства диаметров крышки и тепловыделяющей зоны. Показано, что когда в окрестности верхней крышки не происходит выделения тепла, общее охлаждение пористого объекта оказывается значительно лучше.

## Литература

1. **Маслов В.П., Мясников В.П., Данилов В.Г.** Математическое моделирование аварийного блока Чернобыльской АЭС. — М.: Наука, 1987.
2. **Маслов В.П., Молотков И.А.** Условие отсутствия перегрева в реакторе, оценка критической константы // ДАН. — 2007. — Т. 415, № 4. — С. 475–477.
3. **Маслов В.П., Молотков И.А.** Переход от стационарного охлаждения к перегреву в аварийном реакторе // ДАН. — 2008. — Т. 418, № 4. — С. 482–485.
4. **Маслов В.П., Молотков И.А.** Аварийный реактор в режиме перегрева // ДАН. — 2008. — Т. 421, № 4. — С. 482–485.
5. **Молотков И.А.** Локализация тепловой энергии в аварийном реакторе в процессе его перегрева // ДАН. — 2008. — Т. 422, № 5. — С. 608–611.
6. **Маслов В.П., Молотков И.А.** Режимы стационарного охлаждения и глобального перегрева в аварийном реакторе // Прикладная математика и механика. — 2008. — Т. 72, № 5. — С. 759–765.
7. **Маслов В.П., Молотков И.А.** Высокотемпературные процессы в пористой среде // Теплофизика высоких температур. — 2009. — Т. 47, № 2. — С. 242–246.
8. **Луценко Н.А.** Одномерный стационарный режим фильтрации газа через слой неподвижного тепловыделяющего конденсированного материала // Дальневосточный математический журнал. — 2002. — Т. 3, № 1. — С. 123–130.
9. **Луценко Н.А.** Нестационарные режимы охлаждения пористого тепловыделяющего элемента // Математическое моделирование. — 2005. — Т. 17, № 3. — С. 120–128.
10. **Левин В.А., Луценко Н.А.** Возникновение неустойчивых режимов охлаждения пористого тепловыделяющего элемента при докритических краевых условиях // Горение и плазмохимия. — 2005. — Т. 3, № 2. — С. 81–92.
11. **Левин В.А., Луценко Н.А.** Течение газа через пористую тепловыделяющую среду при учете температурной зависимости вязкости газа // Инженерно-физический журнал. — 2006. — Т. 79, № 1. — С. 35–40.
12. **Теплицкий Ю.С., Ковенский В.И.** Термомеханика тепловыделяющего зернистого слоя // Инженерно-физический журнал. — 2008. — Т. 81, № 4. — С. 637–645.
13. **Теплицкий Ю.С., Ковенский В.И., Луценко Н.А., Виноградова М.В.** О применимости граничного условия первого рода в задачах теплопереноса в тепловыделяющих зернистых слоях // Инженерно-физический журнал. — 2009. — Т. 82, № 6. — С. 1097–1104.
14. **Ковенский Г.И., Теплицкий Ю.С., Ковенский В.И.** О свободной конвекции в тепловыделяющем зернистом слое // Инженерно-физический журнал. — 2010. — Т. 83, № 2. — С. 229–234.

15. **Теплицкий Ю.С., Ковенский В.И.** О термомеханике тепловыделяющего слоя при переменном размере частиц // Инженерно-физический журнал. — 2011. — Т. 84, № 5. — С. 933–937.
16. **Теплицкий Ю.С., Малевич В.Л.** Свободная конвекция в зернистом слое при тепловыделении различной природы // Инженерно-физический журнал. — 2012. — Т. 85, № 2. — С. 259–265.
17. **Левин В.А., Луценко Н.А.** Численное моделирование двумерных нестационарных течений газа через пористые тепловыделяющие элементы // Вычислительные технологии. — 2006. — Т. 11, № 6. — С. 44–58.
18. **Левин В.А., Луценко Н.А.** Движение газа через пористые объекты с неравномерным локальным распределением источников тепловыделения // Теплофизика и аэромеханика. — 2008. — Т. 15, № 3. — С. 407–417.
19. **Левин В.А., Луценко Н.А.** Нестационарные течения газа через осесимметричные пористые тепловыделяющие объекты // Математическое моделирование. — 2010. — Т. 22, № 3. — С. 26–44.
20. **Левин В.А., Луценко Н.А.** Моделирование двумерных нестационарных течений газа в саморазогревающихся полигонах твердых бытовых отходов // Вычислительная механика сплошных сред. — 2011. — Т. 4, № 1. — С. 55–64.
21. **Луценко Н.А., Мирошниченко Т.П., Одякова Д.С., Харитонов Д.И.** Параллельная реализация алгоритма для расчета двумерных нестационарных течений газа через пористые объекты с источниками тепловыделения // Вычислительные технологии. — 2011. — Т. 16, № 2. — С. 98–110.
22. **Lutsenko N.A.** Modeling of heterogeneous combustion in porous media under free convection // Proc. of the Combustion Institute. — 2013. — Vol. 34, № 2. — P. 2289–2294.
23. **Нигматулин Р.И.** Основы механики гетерогенных сред. — М.: Наука, 1978.
24. **Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р.** Вычислительная гидромеханика и теплообмен. В 2-х т. Т. 1: Пер. с англ. — М.: Мир, 1990.

*Поступила в редакцию 30 мая 2013 г.,  
в окончательном варианте 12 июля 2013 г.*