Опыт применения параллельных вычислений к проблематике шахтной вентиляции

И. М. Васенин, Б. Л. Петушкеев
Томский государственный университет, Томск

Одной из важных задач безопасности жизнедеятельности является мониторинг и прогноз газодинамической обстановки в горных выработках. С целью очистки воздушной среды и создания условий для нормальной работы людей применяется вентилирование. К тому же образующиеся в выработках угольных шахт участки обрушенного пространства являются потенциально опасным очагом выделения и скопления метана, образующего с воздухом взрывоопасную смесь.

Задача проектирования вентиляции в этих условиях для поддержания состава атмосферы, регламентированного нормативными документами, становится еще более актуальной и насущной. Задачи газовой динамики подобного типа являются, особенно в многомерном случае с большим количеством ячеек сетки, типичным примером требовательной к ресурсам компьютера области численного моделирования. Сокращения время расчета можно достичь за счет применения суперкомпьютеров и, соответственно, параллельного программирования.

В данной работе рассматривается трехмерная постановка задачи о переносе метана в обрушенном пространстве. Уравнения сохранения массы (1), импульса (2) и энергии (3) имеют вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_{\Omega}\varepsilon\rho d\Omega+\oint_{\Sigma}\varepsilon\rho\left(\vec{q}\cdot\vec{n}\right)d\Sigma=0; \qquad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_{\Omega}\varepsilon\rho\vec{q}d\Omega+\oint_{\Sigma}\varepsilon\left[p\vec{n}+\left(\vec{q}\cdot\vec{n}\right)\vec{q}\rho\right]d\Sigma=\int_{\Omega}\vec{F}_c d\Omega+\int_{\Omega}pgrad\varepsilon d\Omega+\int_{\Omega}\varepsilon\rho\vec{g}d\Omega \qquad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_{\Omega}\varepsilon\rho\left(e+\frac{|\vec{q}|^2}{2}\right)d\Omega+\oint_{\Sigma}\varepsilon\rho\left(\vec{q}\cdot\vec{n}\right)\left[e+\frac{p}{\rho}+\frac{|\vec{q}|^2}{2}\right]d\Sigma-\int_{\Omega}\varepsilon\rho\left(\vec{q}\cdot\vec{n}\right)d\Omega=0, \qquad (3)$$

где $\vec{q}$ — вектор скорости, ε — пористость среды, $\vec{g}$ — ускорение силы тяжести, $\vec{F}_c$ — вектор объемных сил сопротивления, взятого в форме Эргуна [1]. Слагаемое $\int_{\Omega} pgrad\varepsilon d\Omega$ в правой части уравнения движения появляется в результате учета импульса дав-

ления со стороны пористой среды, слагаемое $\int_{\Omega} \varepsilon \rho \vec{g} d\Omega$ учитывает силу тяжести. В уравнении энергии член $\int_{\Omega} er(\vec{g} \cdot \vec{q}) d\Omega$ отвечает за влияние силы тяжести на энергию объема двухфазной среды.

Уравнение переноса запишем в форме уравнения неразрывности для метана:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \varepsilon c \rho d\Omega + \oint_{\Sigma} \varepsilon c \rho (\vec{q} \cdot \vec{n}) d\Sigma = 0, \tag{4}$$

где c — концентрация метана.

Для замыкания системы уравнений нужно добавить уравнение состояния вида:

$$e = \frac{1}{k-1} \frac{p}{\rho}, \; k = \frac{C_{pм} c + C_{pв}(1-c)}{C_{vм} c + C_{vв}(1-c)}, \tag{5}$$

где индекс «*в*» относится к воздуху, а «*м*» означает метан; C_p и C_v — удельные теплоемкости при постоянном давлении и объеме соответственно.

В работе используются реальные геометрические размеры выработанного пространства, происходит учет различного рода скважин и штреков вентилирования, а также особенностей метановыделения, что закономерно увеличивает достоверность прогноза. Физическая область расчетной задачи показана на Рис.1.

Геометрические размеры следующие:

- длина — 1600 м (координата x),
- ширина — 400 м (координата z),
- высота — 12м.

На рис. 1 введены обозначения: 1 — конвейерный штрек, 2 — вентиляционный штрек, 3 и 4 — газоотсасывающие скважины, 5 — сбойка на газодренажный штрек.

Задание пористости среды определялось свойством прогиба свода кровли по направлениям обоих координат и, таким образом, представлялась функцией $f(x,y)$.

Для решения поставленной задачи используется явный численный метод Годунова первого порядка точности [2], показавшего свою надежность в нестационарных задачах газовой динамики. Расчет проводится до момента равенства общего прихода и расхода газов (воздух, метан) с точностью до нескольких процентов. Шаг по времени для простоты считался постоянным.

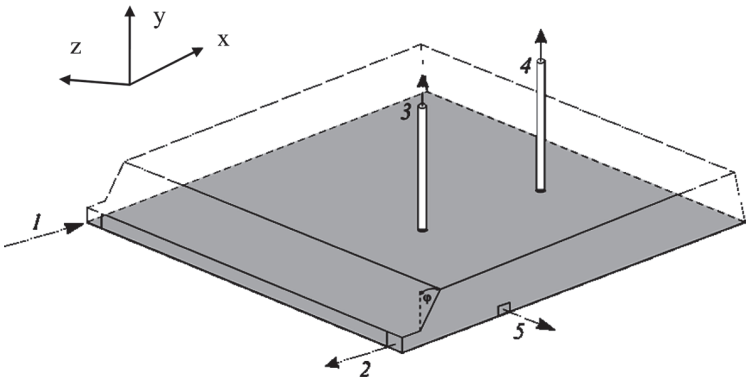


Рис. 1. Граничные условия задавались следующим образом: 1 — через канал 1 происходит вдув воздуха с постоянной скоростью $U = 0{,}67$ м/с, вторым условием является значение энтропии для воздуха при стандартном давлении $P0 = 101325$ Па. 2 — канал 2 — выпускной, поэтому достаточно определения давления на выходе, принятое равным $P0$. 3 — элементы 3, 4 являются вытяжками: на всех задавалось значение энтропии S при давлении $P0$ для метана. Скорость отсоса вентиля 4 — U1 = 0,3 м/с, вентиля 3 также $U1$. 4 — приток метана происходит с «потолка» выработки таким образом, что максимум имеет место при x = 50 м, экспоненциально убывая по длине. При этом суммарный объем метановыделения составляет V = 52 м^3/с. Данные получены на основании проведенных экспериментов горными инженерами. 5 — Сбойка 5 была заглушена и U = 0 м/с. 6 — На всех других границах действуют условия непротекания: U = 0.

Задание начальных данных предполагает, что объем покоится: $\vec{q} = 0$ и его снизу наполовину высоты пространства заполняет метан: c = 1, остальное — воздух (в целях уменьшения времени установления). Распределение давления отражает факт изменения давления с высотой, а распределение плотности находится по уже заданным величинам с помощью уравнения состояния.

Также в работе предложен метод адаптации вычислительной схемы Годунова на компьютер с массивно-параллельной архитектурой, показавший свою эффективность. Алгоритм осуществлен на основе библиотеки передачи данных MPI и языка C++. Расчеты проводились на кластере СКИФ Cyberia Томского государственного университета с привлечением до нескольких сотен процессоров. На рис. 2 приведены результаты исследования

реализованной программы на масштабируемость в двух случаях используемой топологии процессов.

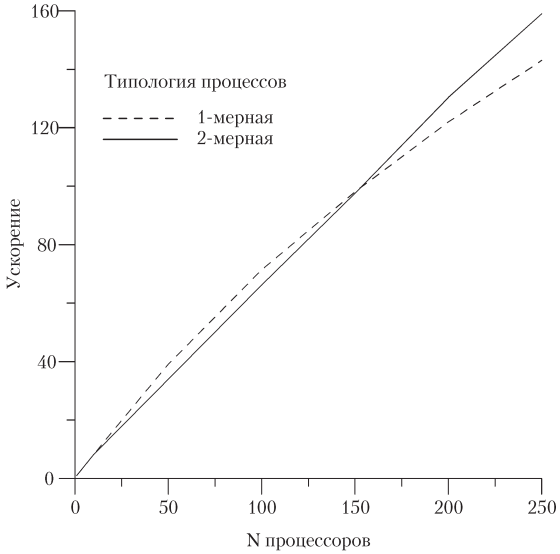


Рис. 2

На рис. 3 показана концентрация метана в горизонтальных сечениях на различных высотах в момент времени 500 ч. Характерно присутствие на уровне 1 м четко выраженной вблизи скважины 3 тянущейся вплоть до стенки струйки газа с малым содержанием метана, причем у второй скважины такой же мощности подобного не наблюдается. Такое движение за время порядка нескольких десятков часов становится ярко выраженным и, по-видимому, вызвано наличием внизу течения, сносящего область пониженного давления на некоторое расстояние от оси действия верхнего насоса. Чуть выше (средний график на рис. 3) это воздействие уже не так остро выражено, но все же заметно смещение в сторону от входного штрека. Изолинии концентрации метана на нижнем графике рис. 3 имеют, как и ожидалось, продольный по координате x характер, отчетливо видна работа обоих насосов. К тому же в удаленной от лавы области, где действие насосов практически не сказывается, явно выделилась обширная зона повышенного содержания метана.

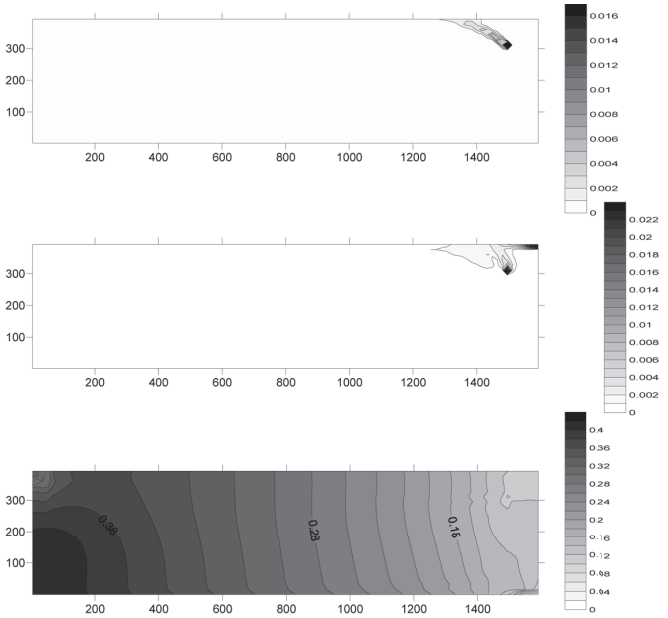


Рис. 3. Концентрация метана на высоте 1 м, 5 м, 11 м (сверху вниз) на момент времени 500 ч (установившееся распределение)

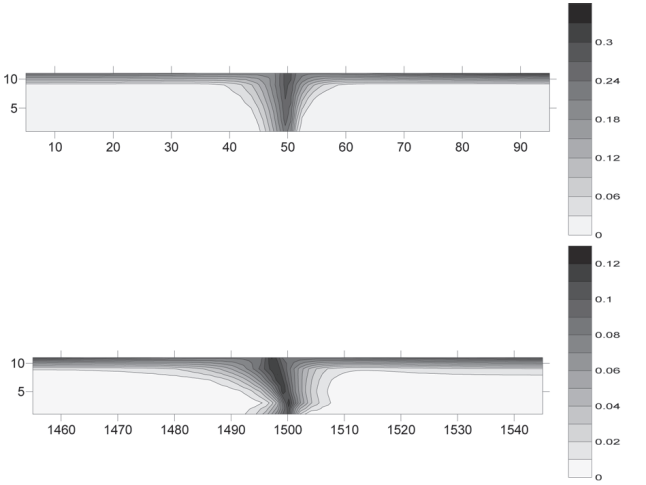


Рис. 4. Концентрация метана в сечении скважин (момент времени 500 ч)

В сечениях по оси z на рис. 4 приведены профили концентрации метана в местах расположения обоих насосов на момент окончания расчета. Можно отметить закономерный факт скопления метана в верхней части выработанного пространства, что естественно в силу меньшей плотности по сравнению с воздухом, и достижение нижнего основания зоной отсоса скважин. Последнее явление экспериментально не подтверждается, поскольку в этом случае имеет место эффект уплотнения тяжелыми и плотными обрушенными породами нижнего настила, тем самым не позволяя проникать посторонним примесям. Отметим также важный факт непревышения допустимой концентрации метана, равной 2 %, на выходном сечении 2.

Представленная модель может быть использована для оперативного прогноза качества воздуха в выработках, поскольку ее применение обеспечивает высокую скорость получения результатов при достаточно хорошей точности предсказания. На данный момент при поддержке Минестерства Энергетики РФ ведется работа с целью создания программного комплекса, направленного на получение рекомендаций к созданию эффективных или доработке текущих систем вентиляции с учетом горно-геологических условий на шахтах России.

Литература

1. **Справочник по теплообменникам** : В 2 т. — М. : Энергоатомиздат, 1987. — Т. 1. — 561 с.

2. **Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я.** Численное решение многомерных задач газовой динамики. — М. : Наука, 1976. — 333 с.