

АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАЗДРОБЛЕННОЙ ПОРОДЫ С ПОТОКОМ ГАЗА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ВЗРЫВА

С. Мохаммади, А. Бебамзаде

Школа строительства, Университет Тегерана, Иран, smoham@ut.ac.ir

В данном исследовании предпринята попытка приспособить комбинированную методологию конечных дискретных элементов для объединения уравнений газовой динамики и состояния деформирования твердого тела с целью разработки численного метода моделирования процессов в хрупких твердых средах, таких как горные породы. Используется стандартный метод конечных элементов с учетом разупрочнения при моделировании инициирования и распространения трещин в твердом теле, возникающих под действием высокого давления в газе. Это переменное высокое давление определяется уравнениями сохранения массы и импульса газа. Поведение газа полностью увязано с деформациями в твердом теле, которые изменяют плотность и пористость, входящие в уравнения газовой динамики, и основано на новых модификациях подхода, предложенного авторами данной работы в их недавних публикациях. Модель течения детонационного газа учитывает пространственное распределение давления и массы детонационного газа в пределах сложной геометрии трещиновато-раздробленной твердой (горной) породы. Полные нелинейности геометрии и материала учитываются за счет использования полностью деформируемой сетки метода конечных элементов и анализа трещиновато-раздробленных дискретных элементов. Используются методы локальной адаптивной перестройки (обогащения) сетки для геометрического моделирования распространения трещин.

Ключевые слова: взрыв в горной породе, взаимодействие газа и твердого тела, течение газа, метод конечных элементов.

ВВЕДЕНИЕ

Взрыв часто используется в горно-рудной промышленности и при прокладке тоннелей. Подрыв взрывчатки в буровых скважинах приводит к образованию трещин в больших каменных массивах и дроблению породы на малые куски. Было предложено несколько основанных на эксперименте эмпирических формул для учета начальной геометрии скважины и механических свойств взрывчатки. Модель дробления Куца — Рэма принадлежит к числу наиболее часто используемых, на ее основе разработано несколько компьютерных программ [1].

С другой стороны, в разные годы неоднократно предпринимались попытки разработать расчетные алгоритмы для более реалистичного моделирования этого крайне сложного явления. Однако необходимость учета разнообразных механических факторов, таких как пластичность, механика дробления, газовая динамика, химические и механические процессы детонации и взрыва, сделало численное моде-

лирование сплошной или трещиноватой среды, подвергаемой взрывным нагрузкам, одним из наиболее трудных видов моделирования, которое могло бы дать практические рекомендации для промышленности.

Существует тесная связь между процессами в газовой и твердой фазах. Детонация вызывает фазовый переход взрывчатого вещества в газ с высоким давлением и температурой. Часть выделившейся энергии взрывчатого вещества передается твердому телу и приводит к деформации, ускорению, разрушению и дроблению твердого материала. Расширение газа и его течение в пределах открывшихся трещин, а также потребление энергии на деформацию твердого тела снижают давление газа. Поэтому газовый взрыв и трещинообразование — тесно взаимосвязанные явления, в которых давление газа воздействует на твердое тело и вызывает его деформацию и растрескивание, при этом изменяются такие характеристики газа, как давление и плотность [2].

В последние годы предложено несколько моделей деформации твердого тела под действием давления газа [1–5]. Простейшая из них основана на определяемой пользователем за-

висимости давления от времени [1], при этом не учитывалось взаимодействие между твердым телом и газом, что приводило к решению, зависящему от пользователя. Простая, но более точная модель учета газовой детонации предложена в работе [3], но в ней отсутствовало моделирование течения газа в рамках метода комбинированных конечных/дискретных элементов. Несколько позднее был разработан ряд моделей, в которых частично учитывалось течение газа внутри открывшейся трещины [4, 5]. Эти модели можно разбить на два основных класса: первый требует обнаружения течения газа внутри независимых трещин сложной геометрии и сопряжен с использованием довольно сложных алгоритмов обнаружения контактных границ; второй класс разработан для моделирования независимого течения внутри пористой среды, эквивалентной твердой трещиноватой среде, и основную трудность в нем представляет реалистичная оценка пористости [6–10].

С целью облегчения разработки эффективного и надежного численного подхода для анализа взрыва предлагается относительно сложный алгоритм взаимодействия, в котором применяются две независимые сетки для анализа процессов в твердой и газовой фазах. Уравнения газовой фазы в пористой среде используются для вычисления давления, массообмена, энергии и расширения газа в каждой конкретной точке [11]. Решение для твердой фазы находится с использованием полученного значения давления газа методом конечных и дискретных элементов (КЭ/ДЭ) [12–14], который позволяет анализировать взаимодействие для широкого диапазона дискретных тел и материалов. Необходимо увязать метод КЭ/ДЭ с уравнениями газовой динамики для изучения динамического поведения трескающихся при взрыве каменных масс. Модель, в которой взаимодействие газовой и твердой фаз будет реализовано в комбинированном методе КЭ/ДЭ, позволит вычислять пространственное распределение давления детонационного газа, работу, совершаемую расширяющимся газом, и полную массу детонационного газа как функций времени, т. е. модель будет отражать изменение как массы взрывчатого заряда, так и размера раскалываемого твердого блока [15].

Предлагаемый алгоритм учитывает образование новых линий/кромки/тел, создаваемых при растрескивании и дроблении. Исполь-

зуется пластическая модель Рэнкина деформационно разупрочняющегося тела для учета энергии разрушения, выделяющейся при образовании/распространении трещин [12].

В настоящей работе излагается основа нового численного подхода к моделированию чрезвычайно сложной задачи взрыва в скальной породе. Предлагаемая методология делает только первые шаги, чтобы проиллюстрировать, как такая инженерная задача, включающая в себя весьма сложные термомеханические явления, может быть эффективно разделена на хорошо разработанные модули, а затем скомбинирована для получения реалистичных результатов. Ожидается, что метод будет давать основанные на численном расчете рекомендации для моделирования взрывных нагрузок и для задач взаимодействия газовой и твердой фаз и тем самым станет надежным инструментом для анализа сложных явлений взрыва в горных породах. Однако для достижения этой долгосрочной цели требуются дополнительные исследования.

Несмотря на то, что реальные взрывные ситуации являются трехмерными задачами, в данной статье излагаются только двумерные модели. Настоящий двумерный подход крайне сложен, и переход к общим трехмерным приложениям осуществим только при должной проработке, верификации и калибровке модели.

ГАЗОВАЯ И ТВЕРДАЯ ФАЗЫ

Ранее были разработаны микро- и макроскопические уравнения состояния для изучения физического поведения газовой и твердой фаз пористой среды [15]. Каждую фазу можно рассматривать отдельно или изучать в пределах многофазной пористой среды. Здесь рассматриваются только необходимые двумерные уравнения сохранения массы и импульса. Аналогичные уравнения можно вывести и реализовать для трехмерных задач с многими фазами.

Уравнение баланса массы для твердой или газовой фазы на микроскопическом уровне запишем в виде [11]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \dot{r}) = 0, \quad (1)$$

где \dot{r} — скорость фазы в фиксированной точке пространства, ρ — средняя по объему массовая плотность. Уравнение баланса массы для газовой фазы на макроскопическом уровне имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial t} (n\rho^g) + \operatorname{div}(n\rho^g \mathbf{v}^g) = 0, \quad (2)$$

где ρ^g — средняя плотность газовой фазы, \mathbf{v}^g — среднемассовая скорость газа, n — объемная доля. Макроскопический линейный импульс принимает следующую форму [11]:

$$n\mathbf{v}^{gs} = \frac{\mathbf{k}k^{rg}}{\mu^g} [-\nabla p^g + \rho^g(\mathbf{g} - a^s - a^{gs})], \quad (3)$$

где μ^g — динамическая вязкость, p^g — давление в газе, \mathbf{g} — ускорение свободного падения, a^{gs} — относительное ускорение, \mathbf{k} — тензор проницаемости среды, k^{rg} — параметр относительной проницаемости. Полагая скорость твердой фазы равной нулю ($\mathbf{v}^s = 0$), $\mu^g = 1$ и пренебрегая ускорением свободного падения, относительными ускорениями и ускорениями твердой фазы по сравнению с очень высокими давлениями, приводим уравнение (3) к виду

$$n\mathbf{v}^g = \mathbf{k}k^{rg}(-\nabla p^g). \quad (4)$$

Уравнение массы и импульса получается комбинированием уравнений (2), (4):

$$\frac{\partial}{\partial t} (n\rho^g) + \operatorname{div} [\mathbf{k}k^{rg} \rho^g (-\nabla p^g)] = 0. \quad (5)$$

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГАЗОВОЙ И ТВЕРДОЙ ФАЗ

В данном параграфе вводится алгоритм взаимодействия, основанный на модели двух сеток. Двухсеточные модели ранее были предложены для решения совместных задач. В [3] обсуждались потенциальные шаги для решения задачи взаимодействия газовой и твердой фаз, сформулировать задачу и реализовать ее решение не удалось, была лишь построена простая модель без учета течения газа и с ее помощью решено несколько задач о взрыве. В последнее время нами была разработана новая двухсеточная модель, учитывающая течение газа внутри твердой трещиноватой и деформированной среды [15]. Здесь мы следуем той же методике с новыми модификациями для устранения недостатков исходного подхода.

Настоящий алгоритм использует одну сетку для моделирования твердого вещества (S-сетка) и другую — для моделирования газовой фазы (G-сетка) (рис. 1). Для отображения всех необходимых данных и переменных

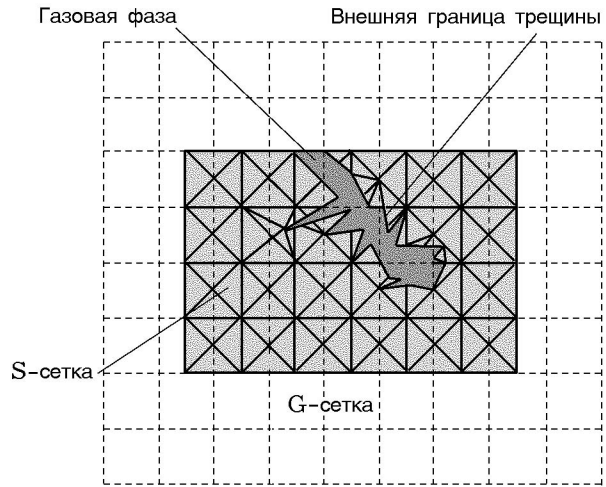


Рис. 1. Двухсеточная модель для согласования твердой и газовой фаз

состояния с твердой сетки на газовую и обратно применяются стандартные процедуры. Данные, отображенные на G-сетку, можно использовать для вычисления пористости, а данные о газе, отображенные на S-сетку, — главным образом для приложения получающегося результирующего давления к конечным элементам и/или узлам. Процедура непрерывно повторяется на последующих временных шагах.

Для анализа G-сетки применяются принципы механики пористых сред. Во-первых, предполагается, что в газовой фазе нет твердого вещества и выполняются только уравнения сохранения массы и импульса. Твердая фаза вносит вклад в уравнения равновесия только через коэффициент проницаемости \mathbf{k} . Уравнение (5) для газовой фазы ($n = 1$) принимает вид

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho^g) + \operatorname{div} [\mathbf{k}k^{rg} \rho^g (-\nabla p^g)] = 0 \quad (6)$$

при следующих граничных условиях:

$$\rho^g \mathbf{k}k^{rg} (-\nabla p^g)^T \cdot \mathbf{n} = 0 \quad \text{на границе } \Gamma_g^q, \quad (7)$$

где $\mathbf{n} = \{n_x, n_y, n_z\}^T$ — вектор нормали и нет притока массы.

Уравнения (6), (7) могут быть записаны [15] в виде взвешенных невязок:

$$\int_{\Omega} \mathbf{W}^T \left\{ \nabla^T [\mathbf{k}(-\nabla p^g)] + \frac{\partial \rho^g}{\partial t} \right\} d\Omega + \int_{\Gamma_g^q} \mathbf{W}^T [\mathbf{k}(-\nabla p^g)^T \cdot \mathbf{n}] d\Gamma = 0, \quad (8)$$

где \mathbf{W} — весовая функция невязки. Применив теорему Грина, получим

$$\int_{\Omega} (\nabla \mathbf{W})^T \mathbf{k} \rho^g \nabla p^g d\Omega + \int_{\Omega} \mathbf{W}^T \frac{\partial \rho^g}{\partial t} d\Omega = 0. \quad (9)$$

Давление p^g будем определять по узловым давлениям \bar{p}^g , используя стандартные конечно-элементные функции формы \mathbf{N}_p :

$$p^g = \mathbf{N}_p \bar{p}^g. \quad (10)$$

В формулировке Галеркина весовые функции невязки можно полагать такими же, как функции формы, $\mathbf{N}_p = \mathbf{W}$, поэтому уравнение (9) сводится к следующему:

$$\int_{d\Omega} (\nabla \mathbf{N}_p)^T \mathbf{k} \rho^g \nabla \mathbf{N}_p \bar{p}^g d\Omega + \frac{1}{\partial t} \int_{\Omega} \mathbf{N}_p^T \partial \rho^g d\Omega = 0. \quad (11)$$

Рассматривая уравнение (11) как представляющее изменение массы за единицу времени, перепишем его в более подходящей форме:

$$\mathbf{M}_{t+\Delta t} = \mathbf{M}_t - \Delta t \mathbf{H}_t^p \bar{p}_t^g, \quad (12)$$

где \mathbf{H}_t^p — матрица проницаемости, определяемая по формуле

$$\mathbf{H}_t^p = \int_{\Omega} (\nabla \mathbf{N}_p)^T \mathbf{k} \rho^g \nabla \mathbf{N}_p d\Omega. \quad (13)$$

Простейшим возможным вариантом G-сетки является структурированная сетка из квадратных ячеек. Тогда функцию формы \mathbf{N}_p и ее производную можно определить следующим образом:

$$\mathbf{N}_p = 0.25 \times$$

$$[(1-x)(1-y) (1+x)(1-y) (1+x)(1+y) (1+x)(1+y)], \quad (14)$$

$$\nabla \mathbf{N}_p = 0.25 \times$$

$$\times \begin{bmatrix} -(1-y) & (1-y) & -(1+y) & (1+y) \\ -(1-x) & -(1+x) & (1-x) & (1+x) \end{bmatrix}, \quad (15)$$

при этом $d\Omega = a^2 dx dy$, где a — размер квадратного элемента.

Пусть плотность $\bar{\rho}^g$ и проницаемость \bar{K} — средние значения по объему элемента газа. Тогда можно вычислить простую матрицу:

$$\mathbf{H}_t^p = \frac{1}{6} a^2 \bar{\rho}^g \bar{K} \begin{bmatrix} 4 & -1 & -1 & -2 \\ -1 & 4 & -2 & -1 \\ -1 & -2 & 4 & -1 \\ -2 & -1 & -1 & 4 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Более точное решение получается, если применяются аналогичные функции формы для аппроксимации вариаций плотности и пористости внутри элемента. После громоздких вычислений находим элементы симметричной матрицы \mathbf{H}_t^p :

$$\mathbf{H}_{ij}^p = \frac{1}{360} \mathbf{K}^T \mathbf{D}_{ij} \rho, \quad (17)$$

где

$$\mathbf{K}^T = [K_1 \ K_2 \ K_3 \ K_4], \quad (18)$$

$$\boldsymbol{\rho}^T = [\rho_1 \ \rho_2 \ \rho_3 \ \rho_4], \quad (19)$$

и элементы симметричной матрицы \mathbf{D} :

$$\mathbf{D}_{11} = \begin{bmatrix} 48 & 18 & 18 & 6 \\ 18 & 28 & 6 & 8 \\ 18 & 6 & 28 & 8 \\ 6 & 8 & 8 & 8 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D}_{12} = \begin{bmatrix} -18 & -8 & -3 & -1 \\ -8 & -18 & -1 & -3 \\ -3 & -1 & 2 & 2 \\ -1 & -3 & 2 & 2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D}_{13} = \begin{bmatrix} -18 & -3 & -8 & -1 \\ -3 & -14 & -1 & -2 \\ -8 & -1 & -18 & -3 \\ -1 & -2 & -3 & -2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D}_{14} = \begin{bmatrix} -12 & -7 & -7 & -4 \\ -7 & -12 & -4 & -7 \\ -7 & -4 & -12 & -7 \\ -4 & -7 & -7 & -12 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D}_{22} = \begin{bmatrix} 28 & 18 & 8 & 6 \\ 18 & 48 & 6 & 18 \\ 8 & 6 & 8 & 8 \\ 6 & 18 & 8 & 28 \end{bmatrix},$$

$$D_{23} = \begin{bmatrix} -12 & -7 & -7 & -4 \\ -7 & -12 & -4 & -7 \\ -7 & -4 & -12 & -7 \\ -4 & -7 & -7 & -12 \end{bmatrix},$$

$$D_{24} = \begin{bmatrix} -18 & -3 & -8 & -1 \\ -3 & 2 & -1 & 2 \\ -8 & -1 & -18 & -3 \\ -1 & 2 & -3 & 2 \end{bmatrix},$$

$$D_{33} = \begin{bmatrix} 28 & 8 & 18 & 6 \\ 8 & 8 & 6 & 8 \\ 18 & 6 & 48 & 18 \\ 6 & 8 & 18 & 28 \end{bmatrix},$$

(20)

$$D_{34} = \begin{bmatrix} 2 & 2 & -3 & -1 \\ 2 & 2 & -1 & -3 \\ -3 & -1 & -18 & -8 \\ -1 & -3 & -8 & -3 \end{bmatrix},$$

$$D_{44} = \begin{bmatrix} 8 & 8 & 8 & 6 \\ 8 & 28 & 6 & 18 \\ 8 & 6 & 28 & 18 \\ 6 & 18 & 18 & 48 \end{bmatrix}.$$

Теперь процедуру решения можно описать как последовательность следующих шагов.

1. Определяется начальная сетка в твердой фазе (S-сетка) и газовой фазе (G-сетка). Для создания подходящей сетки, сгущающейся вокруг взрывной скважины, можно использовать генератор общей конечно-элементной неструктурированной сетки. Используется структурированная квадратная G-сетка.

2. Задаются начальные значения M_n^0 , p_n^0 в узлах G-сетки и вычисляется объем твердой фазы, связанный с каждым узлом G-сетки. Затем задается объем твердой фазы с давлением p в соответствии с уравнением состояния для твердого материала, что позволяет точно вычислить объем пор узлов G-сетки.

3. Вычисляется матрица проницаемости H_{pe}^0 путем вычисления начальной средней плотности $\bar{\rho}$ и начальной проницаемости K_0 элемента.

4. Новые давления в узлах могут быть определены с помощью простой итерационной процедуры: начальное приближение для давления, вычисление его работы вследствие изменения пористости и нахождение нового давления из уравнения состояния несовершенного газа до

тех пор, пока не будет достигнута приемлемая погрешность.

5. После того как найдено сходящееся решение для давления, давление в узлах S-сетки вычисляется интерполяцией по значениям в узлах G-сетки. Затем анализируется модель твердой фазы с использованием явного динамического метода КЭ/ДЭ, в том числе проводятся анализ трещин на основе модели твердого материала, необходимая перестройка сетки и геометрическое моделирование трещин.

6. Опять вычисляются новые значения пористости на G-сетке и находятся новые значения массы из давлений в узлах p_n : $M_n^1 = M_n^0 - \Delta t H_{pe}^0 \bar{p}_n^0$.

ЧИСЛЕННАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ

В этом параграфе численно решаются три задачи с целью оценки эффективности метода. Основное внимание уделяется изучению задач, которые не могут быть решены другими численными методами из-за сложности проблемы взаимодействия различных явлений.

Для упрощения подготовки начальных геометрических данных предполагается, что исходные модели являются цельными сплошными кусками породы. Твердую фазу затем можно подвергать растрескиванию и дроблению под действием высоких давлений при взрыве. Это ясно показывает возможности метода при рассмотрении, например, разрывов горных пород под действием взрывных нагрузок, что и планируется сделать в будущем. Во всех численных расчетах используются структурированные G-сетки из квадратных элементов.

Пример 1. Моделируется поведение твердого материала камеры, заполненной взрывчаткой. Эта задача использовалась в ряде предшествующих работ [3, 13, 15] для верификации разнообразных формулировок взаимодействия между газом и твердой фазой.

Рис. 2 иллюстрирует начальную геометрию камеры, масса взрывчатого вещества 148 кг, плотность 240 кг/м^3 , скорость детонации 1725 м/с . В этом тесте любое изменение давления газа вызывается истечением газа через открытый торец камеры.

На рис. 3 показано изменение во времени давления на левом конце камеры, полученное настоящим методом; для сравнения приведены результаты экспериментов [3]. Их близкое со-

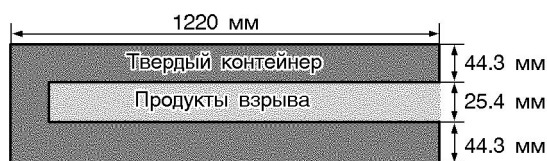


Рис. 2. Геометрия твердого контейнера:
масса взрывчатого материала 148 кг, плотность 240 кг/м^3 , скорость детонации 1725 м/с

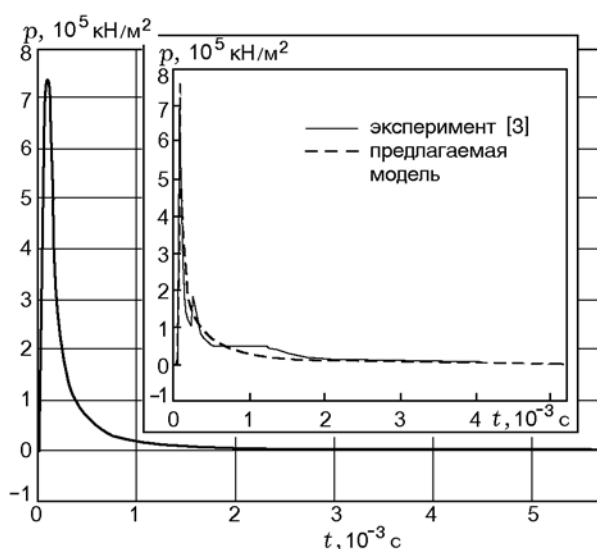


Рис. 3. Профили давления, полученные с помощью предлагаемого подхода, в сравнении с результатами работы [3]

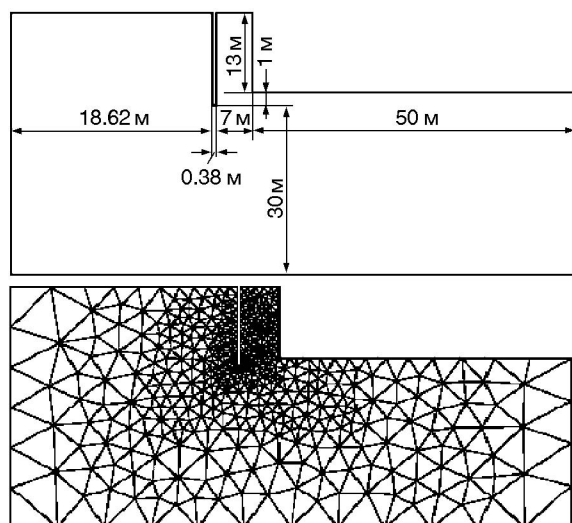


Рис. 4. Геометрия задачи и конечно-элементная модель взрыва в камне при наличии одной взрывной скважины

гласие указывает на то, что можно эффективно использовать предложенную модель для прогнозирования изменения давления вследствие истечения газа из взрывных скважин, а также из трещин или отверстий.

Аналогичные результаты были получены по алгоритму, предложенному ранее авторами в [15]. Оба подхода моделирования течения газа, возникающего из-за изменения объема газа, дают близкие результаты и хорошо согласуются с уже опубликованными результатами.

Пример 2. Моделируется пример, изучавшийся ранее в [3]. Рассматривается скважина глубиной 13 м, расположенная вблизи края каменного массива. Только девять метров, считая от дна скважины, заполнены взрывчаткой, так что верхняя часть скважины пуста. Рис. 4 иллюстрирует геометрию задачи и конечно-элементную модель. Механические свойства породы: модуль упругости $E = 28\,000 \text{ МПа}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0.1$, плотность $\rho = 4\,200 \text{ кг/м}^3$, интенсивность уменьшения объема $\lambda = 1.2 \cdot 10^{10} \text{ кг/м}^3$, интенсивность выделения энергии разрушения $G_f = 250 \text{ Н}\cdot\text{м/м}^2$, напряжение растяжения $\sigma_p = 50 \text{ МПа}$, напряжение сжатия $\sigma_{сж} = 2\,500 \text{ МПа}$. Свойства взрывчатого вещества: начальная плотность $\rho_0 = 276.165 \text{ кг/м}^3$; плотность в начальной точке $\rho_f = 850 \text{ кг/м}^3$; параметр $\alpha = 10.99 \cdot 10^{-10}$; показатель адиабаты газа $\gamma = 2.5$; давление в точке f $p_f = 3.4 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$; время воспламенения $t_G = 10^{-9} \text{ с}$; удельная энергия взрыва $Q_e = 3\,700 \text{ кДж/кг}$; скорость детонации $D = 1\,725 \text{ м/с}$; объем скважины, занятый зарядом, 0.3429; коэффициент проницаемости $k = 3 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{Па}\cdot\text{с})$.

Генерируется адаптивная неструктурированная сетка треугольных элементов для создания очень мелкой сетки конечных элементов вокруг скважины и в месте, где ожидается концентрация напряжений и трещин; более грубые конечные элементы используются для уменьшения вычислительных издержек и времени счета (см. рис. 4). В общей сложности в начале анализа используются 876 конечных элементов.

Предполагается, что все границы, за исключением верхних свободных краев, жестко зафиксированы в направлениях координат x и y . Предполагается, что эти части границы лежат достаточно далеко от скважины и не влияют на решение посредством отраженных волн. Поэтому не требуются специальные неот-

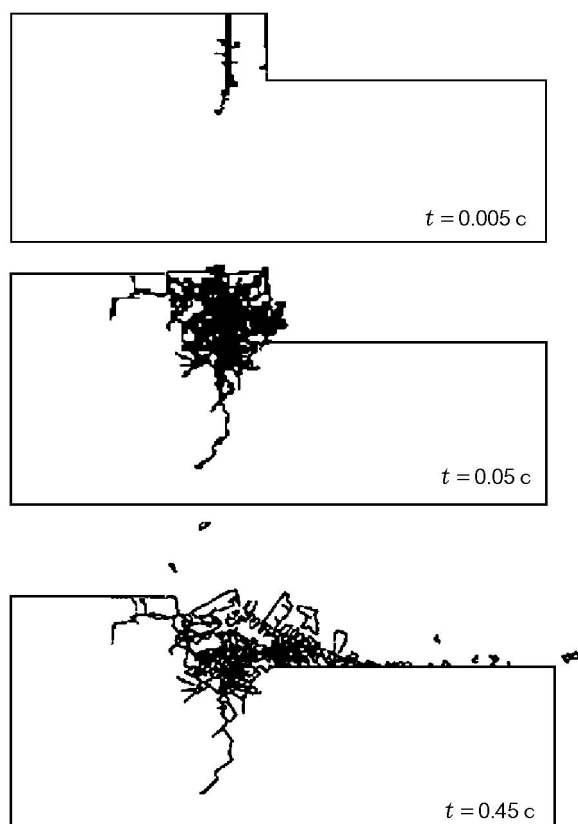


Рис. 5. Распространение трещин и дробления в последовательные моменты времени

ражающие или поглощающие граничные условия. Важно отметить, что такие граничные условия обязательны для реалистичного анализа взрыва при моделировании бесконечной области конечной моделью.

Прогрессирующее трещинообразование в последовательные моменты времени показано на рис. 5. При детонации взрывчатого вещества генерируется высокое давление газа, которое затем воздействует на твердый материал, вызывая трещины в породе вокруг скважины. При увеличении давления газа при взрыве твердая порода трескается и дробится.

Рис. 6 иллюстрирует развитие контуров пузыря эффективного напряжения. Сначала он развивается симметрично вокруг основания скважины. Но после растрескивания породы распределение давления и получаемые контуры эффективного напряжения в основном следуют геометрии трещин.

Наконец, на рис. 7 сравниваются кривые давления газа на дне скважины, полученные настоящим методом, с приведенными в рабо-

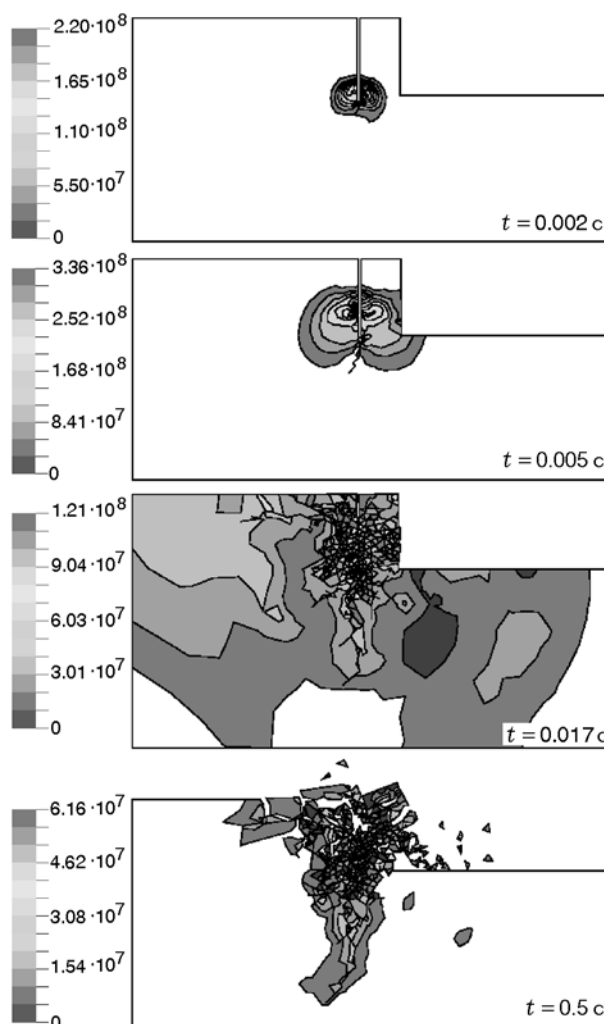


Рис. 6. Эффективные контуры напряжений в различные моменты времени

те [3], где использовалась упрощенная модель без течения газа.

Вычисление распределения размеров обломков, форма метания или столба обломков и геометрия обратного разрушения имеют практическое значение. И хотя картина трещинообразования и дробления, представленная на рис. 5, позволяет сделать качественные оценки, но практических инженерных рекомендаций она дать не может. Однако на данном этапе исследований и не ставилась задача выработки практических рекомендаций.

Пример 3. Рассматривается тот же каменный массив, что и в предыдущем примере. Моделируется взрыв в двух скважинах, как изображено на рис. 8. На рисунке показана также

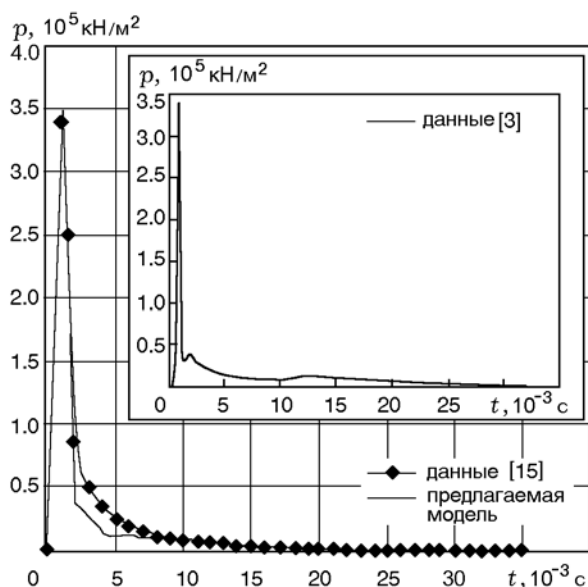


Рис. 7. Сравнение расчетного профиля давления с результатами, полученными по ранее разработанному алгоритму [15] и в работе [3]

конечно-элементная сетка более чем из 2 000 конечных элементов, которые адаптивно генерируются для создания мелкой сетки элементов вокруг скважин, при этом в других под областях создается только грубая сетка элементов с целью обеспечения минимально возможного общего размера расчетной модели.

В случае неодновременных взрывов вначале подрывается левая (первая) скважина, через 0.006 с следует взрыв правой (второй) скважины.

На рис. 9 показаны общие картины контуров эффективного напряжения на последовательных временных шагах, начиная от подрыва первой скважины до ранних стадий после подрыва второй скважины. Развитие пузыря напряжений происходит только вокруг второй скважины, наблюдается постепенное расширение по направлению к нетронутой первой скважине. Немедленно после инициирования взрыва во второй скважине получают сложные контуры эффективного напряжения вследствие очень сложного характера двух взрывных нагрузок и сложной картины трещинообразования и дробления в твердом теле.

Рис. 9 также иллюстрирует трещинообразование и дробление в последовательные моменты времени. Ясно видно обширное трещинообразование и дробление вокруг первой взорвавшейся скважины, в то время как твердый

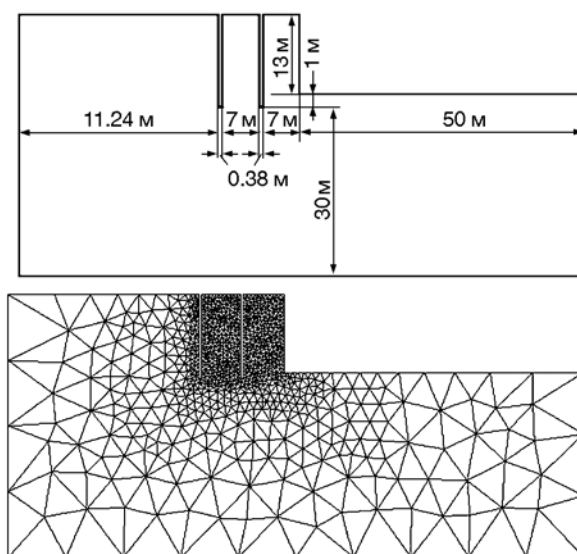


Рис. 8. Геометрия задачи и конечно-элементная модель взрыва при наличии двух взрывных скважин

материал вокруг скважины с несдетонировавшей взрывчаткой остается почти нетронутым на ранних стадиях моделирования. Позднее поле трещинообразования достигает границ второй скважины, которая первоначально предполагалась не заполненной твердой фазой. В действительности мы пренебрегаем любым избыточным давлением или основной деформацией, влияющей на начальную конфигурацию или поведение второй скважины до ее детонации. Второй взрыв происходит, когда твердое тело уже испытало обширные повреждения от первой взрывной нагрузки. Это приводит к новому трещинообразованию и дроблению, заведомо превышающему начальную протяженность, вызванную первым взрывом.

Практически одновременный подрыв двух взрывных скважин почти никогда не используется на практике. Тем не менее, для того чтобы сравнить настоящий алгоритм с имеющимися результатами других исследователей и изучить влияние измельчения конечных элементов на итоговую протяженность поврежденного материала, проводится моделирование одновременного подрыва обеих скважин.

При моделировании использовались грубые и мелкие сетки конечных элементов для сравнения результатов, получаемых с помощью разных конечно-элементных моделей. Грубая сетка состоит из 1 000 узлов и 1 000 элементов, а мелкую сетку создают 2 000 узлов

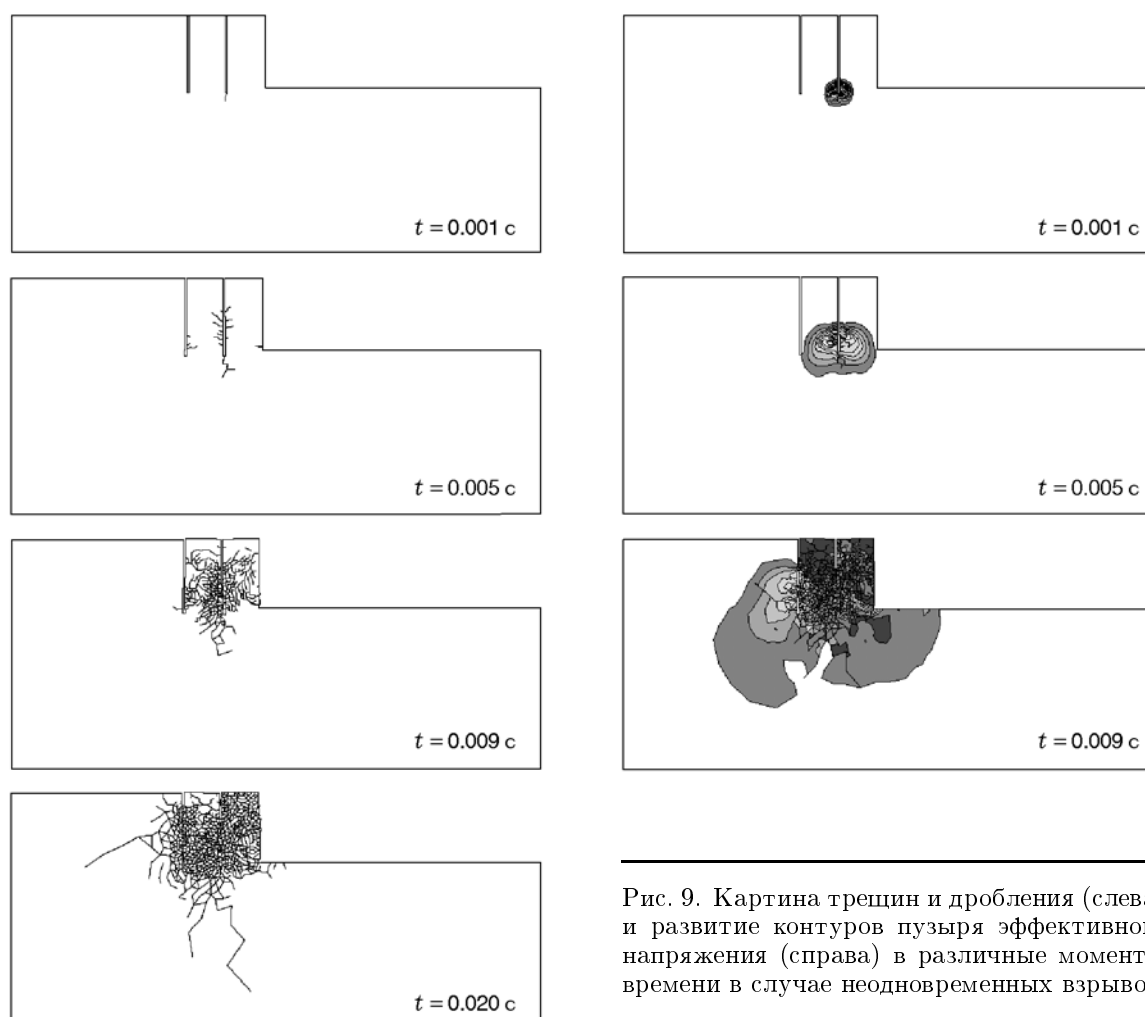


Рис. 9. Картина трещин и дробления (слева) и развитие контуров пузыря эффективного напряжения (справа) в различные моменты времени в случае неодновременных взрывов

и 2 100 элементов. В обоих случаях использовались генераторы адаптивной сетки для создания очень мелкой сетки вокруг скважин, в остальных же подобластях генерировалась грубая сетка, с тем чтобы обеспечить минимально возможный общий размер задачи. На обеих сетках применяются граничные условия, аналогичные условиям в предыдущем примере.

На рис. 10 представлены картины трещин на последовательных временных шагах для грубой и мелкой сеток. Они дают более реалистичные результаты, чем грубые результаты, изложенные ранее в работе [3] (см. нижний рисунок).

ВЫВОДЫ

В данной работе разработана двухсеточная совместная модель взаимодействия газовой динамики/механики твердого тела и ре-

ализована в рамках комбинированного метода конечных/дискретных элементов для моделирования сложного поведения взрыва в горных породах, сопровождаемого обширным разрушением и дроблением в пределах области, что влияет на давление и плотность газа, индуцированного взрывом. Приведено несколько примеров численных расчетов для оценки эффективности предложенного алгоритма. Они включают в себя теоретические тесты и расчеты, выполненные ранее другими исследователями. Однако этот метод становится вычислительно дорогим, когда размер регулярной G-сетки уменьшается с целью улучшить точность расчетов газовой динамики. Поэтому предложено использовать тщательно сконструированную независимую адаптивную G-сетку или сетку, аналогичную S-сетке, для будущих исследований. Можно также изучать влияние

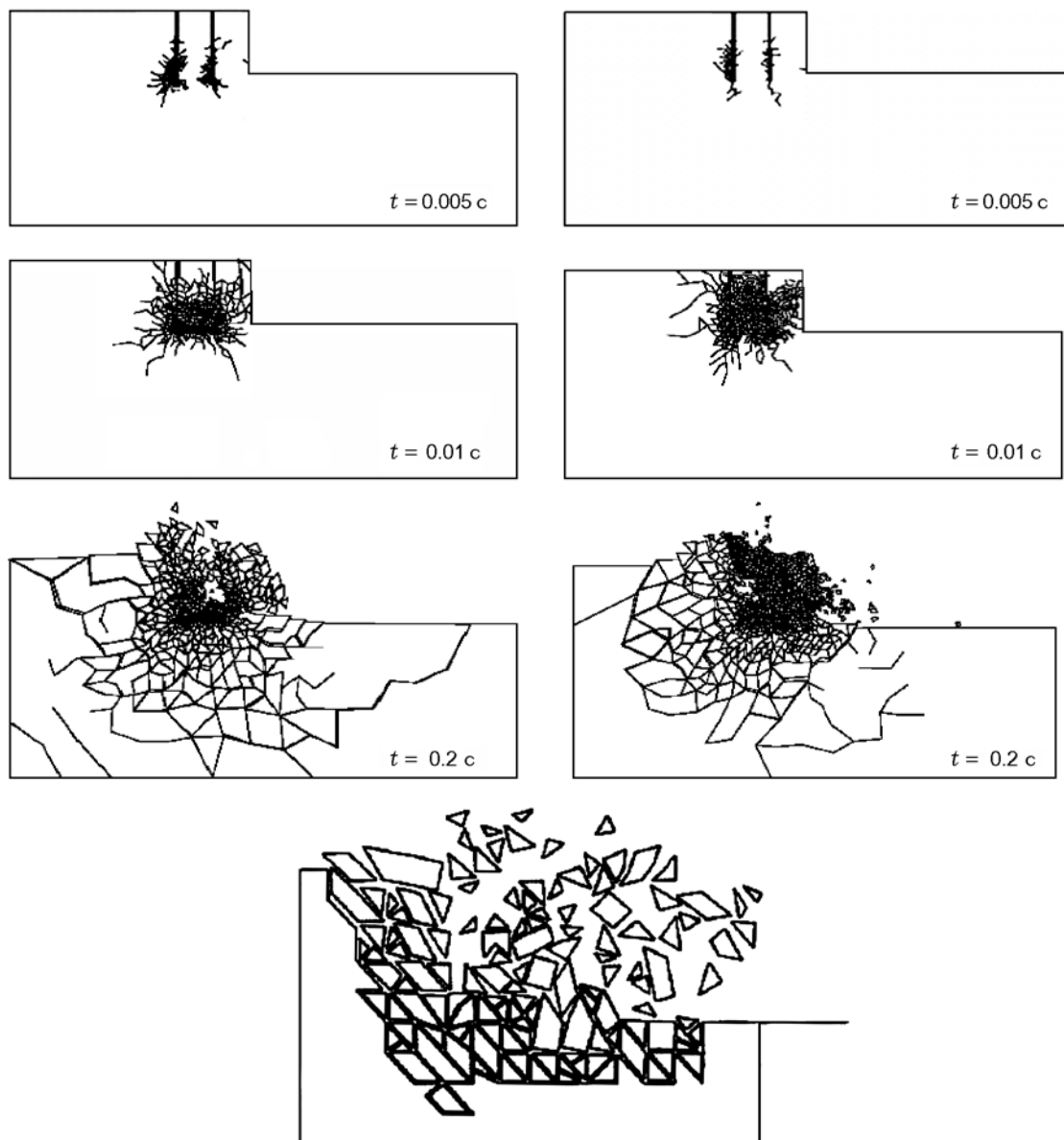


Рис. 10. Картины трещин и дробления в различные моменты времени, полученные при моделировании одновременных взрывов на грубой (слева) и мелкой (справа) сетках, в сравнении с результатами работы [3] (нижний рисунок)

существующих трещин в породе или их соединений на общее и локальное взаимодействие между газом и твердой фазой. Настоящая работа еще далека от ситуации, когда результаты могли бы использоваться на практике в горнодобывающей промышленности, это лишь перспективное направление будущего детерминистского анализа взрывов в горных породах с помощью хорошо разработанного конечно-элементного программного обеспечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Bauer A. A., Fratzos D.** Finite element modeling of pre-split blasting using measured time curves // Soc. of Explosive Engineers Annu. Meeting, Miami, USA, 1987.
2. **Xian L., Bicanic N., Owen D. R. J., Munjiza A.** Rock blasting simulation by rigid body dynamic analysis and rigid brittle fracturing model // Proc. Intern. Conf. on Nonlinear Engineering Computations. Pineridge Press, UK, 1991. P. 477–587.

3. **Munjiza A.** Discrete elements in transient dynamics of fractured media: Ph. D. Thesis. University of Wales Swansea, 1992.
4. **Preece D. S., Burchell S. L., Scovira D. S.** Coupled gas flow and rock motion modeling with comparison to bench blast field data // Proc. 4th Intern. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, 1993. P. 239–247.
5. **Munjiza A., Latham J. P., Andrews K. F.** Detonation gas model for combined finite-discrete element simulation of fracture and fragmentation // Intern. J. Numer. Methods Engng. 2000. V. 49. P. 1495–1520.
6. **Nilson R. H.** An integral method for predicting hydraulic fracture propagation driven by gases or liquids // Intern. J. Rock Mechanics. 1996. V. 22. P. 3–19.
7. **Preece D. S., Thorne B. J.** A study of detonation timing and fragmentation using 3D finite element techniques and damage constitutive model // Proc. 5th Intern. Symp. on Rock Fragmentation by Fragblast-5. 1996. P. 147–156.
8. **Daehnke A., Rossmanith H., Schatz J. F.** On dynamic gas pressure induced fracturing // Intern. J. Blasting and Fragmentation. 1997. V. 1. P. 59–73.
9. **Danell R. E., Lewnardowski T., Laun Mai V. K.** Influence of discontinuities on pre-splitting effectiveness // Ibid. P. 27–41.
10. **Minchinton A., Lynch P.** Fragmentation and heave modeling using coupled discrete element gas flow code // Ibid. P. 49–59.
11. **Lewis R. W., Schrefeler B. A.** The Finite Element Method in the Static and Dynamic Deformation and Consolidation of Porous Media. 2nd ed. England, 1998.
12. **Mohammadi S.** Discontinuum Mechanics Using Finite and Discrete Elements. WIT Press, UK, 2003.
13. **Munjiza A., Owen D. R. J., Bicanic N.** A combined finite-discrete element method in transient dynamics of fracturing solids // Intern. J. Engng Comput. 1995. V. 12. P. 145–174.
14. **Munjiza A., Andrews K. R. F., White J. K.** Combined single and smeared crack model in combined finite-discrete element method // Intern. J. Numer. Methods Engng. 1998. V. 44. P. 41–57.
15. **Mohammadi S., Babamzadeh A.** A coupled gas-solid interaction model for FE/DE simulation of explosion // Finite Elements in Analysis and Design. 2005. V. 41. P. 1289–1308.

Поступила в редакцию 14/III 2006 г.
