

УДК 622.235

**ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПРИ ВЗРЫВЕ
РАССРЕДОТОЧЕННОГО ВОЗДУШНЫМИ ПРОМЕЖУТКАМИ СКВАЖИННОГО ЗАРЯДА
КАК ПРИЧИНА НАЧАЛЬНОЙ СЕТИ ТРЕЩИН В ПОРОДЕ**

В.И. Нифадьев, В.А. Коваленко, М.А. Райымкулов, П.В. Комиссаров, С.С. Басакина

Рассредоточение скважинных зарядов воздушными промежутками широко известно и применяется на практике при БВР. Однако объяснение влияния воздушных промежутков сводится к нескольким гипотезам: более выгодное распределение энергии взрыва за счет разгрузки продуктов детонации в воздушные промежутки и образование различного рода продольных пульсаций в воздушных мешках. Приведена попытка объяснения причин возникновения начальной сети трещин в горном массиве за счет поперечных ударных волн в воздушных промежутках.

Ключевые слова: рассредоточенный заряд; воздушный промежуток; дробление; поперечные ударные волны; газодинамическая неустойчивость.

**GAS DYNAMIC INSTABILITY AT THE EXPLOSION OF AIR-DECKING
BOREHOLE CHARGE AS THE REASON FOR INITIAL ROCK FRACTURING**

V.I. Nifadiev, V.A. Kovalenko, M.A. Raiymkulov, P.V. Komissarov, S.S. Basakina

Air-decking is a well known technique to enhance the rock fracturing. However, the explanation of the effect is reduced to several hypotheses such as for example a better distribution of the explosion energy due to reduction of detonation products pressure in air gaps and the formation of various axial pulsations in air cavities. The article presents an attempt to explain the reason of the initial network of cracks in the rock by the transverse shock waves in air gaps.

Keywords: distributed charge; air-decking; fracturing; transverse shock waves; gas dynamic instability.

В продолжение исследований [1], предлагается рассмотреть возможное влияние поперечных ударных волн на формирование начальной сети трещин в горном массиве. При описании механизма трещинообразования обычно используют одномерные подходы [2]. Так, например, в [3] авторы, применяя теорию ударных труб, делают вывод о том, что важной причиной образования начальной сети трещин являются периодические продольные нагрузки, образующиеся вследствие многократных продольных отражений ударных волн. При этом возникающие волны разгрузки являются причиной растягивающих нагрузок в горном массиве.

При всей простоте и ясности аналитического описания процессов в рассредоточенном воздушными промежутками заряде, одномерный подход имеет существенный недостаток – он не учитывает эффект поперечных ударно-волновых возмущений. А такие возмущения имеют место при взрывах реальных зарядов. Причиной поперечных возмущений могут являться:

- кривизна фронта детонации неидеальных промышленных ВВ [4];
- неровные стенки скважины, способствующие многократным отражениям ударной волны;
- источники вторичных ударных волн. Например, сами стенки скважины, т.к. скорость звука в породе, как правило, выше скорости детонации ВВ и существенно выше скорости звука в воздухе, заполняющего промежутки;
- локальные зоны разгрузки давления вследствие образования трещин в породе;
- различного рода газодинамические неустойчивости потока, образующиеся как на фронте ударной волны, так других областях движущегося газа;
- несимметричное положение боевиков относительно продольной оси скважины.

Для учета некоторых из перечисленных факторов проведены двумерные расчеты в программе “ANSYS AUTODYN Академический” на мелких сетках с размером ячейки в 1×1 мм. В качестве

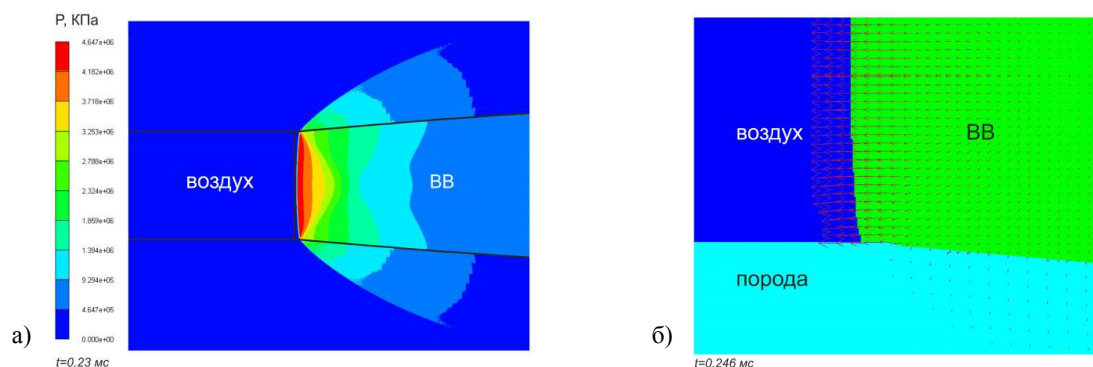


Рисунок 1 – Распределение давления в ВВ до момента выхода ДВ на границу раздела ВВ/воздух. Видна сферическая форма детонационного фронта (а). Векторы массовой скорости газа на фоне карты распределения материала в области контакта ДВ со стенкой скважины (б)

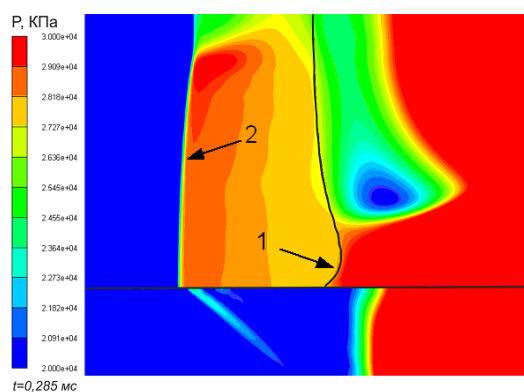


Рисунок 2 – Распределение давления в воздухе и продуктах детонации в момент после отрыва UV от контактной поверхности: 1 – “выгибание” контактной поверхности, 2 – сходящаяся ударная волна

ВВ в расчете использовали идганит [1]. Составления продуктов детонации описывали уравнением Джонса–Уилкинса–Ли (JWL) [5]:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega e_0 \rho_e}{V}, \quad (1)$$

где A, B, R_1, R_2, ω – постоянные величины для заданного ВВ, коэффициенты УРС заданы следующим образом: $A \approx 4,9 \cdot 10^4$ МПа; $B \approx 1,89 \cdot 10^3$ МПа; $R_1 \approx 3,9$; $R_2 \approx 1,12$; $\omega \approx 0,333$; $e_0 \approx 2,484 \cdot 10^3$ МПа/м³. Соответственно, $V = r_e / r_{ne}$, где ρ_e – плотность ВВ; r_{ne} – плотность продуктов взрыва; e_0 – удельная внутренняя энергия.

Для описания поведения горной породы была принята модель Риделя-Тома-Хермайера (RHT Concrete Material Model) [6]. В качестве условия трещинообразования использовали следующий критерий:

$$\left(\sqrt{3J_2} \right)_{fail} = Y_C(p^*) r_3(\theta) F_{rate}(\dot{\epsilon}), \quad (2)$$

где

$$Y_C(p^*) = f_c \left[A \left(p^* - p_{spall}^* F_{rate}(\dot{\epsilon}) \right)^N \right],$$

$$p^* = p / f_c, \quad p_{spall}^* = \frac{f_t}{f_c},$$

J_2 – второй инвариант девиатора тензора напряжений; f_c – прочность пород на одноосное сжатие; A, N – константы, определяемые для конкретной породы; p – гидростатическое давление; f_t – прочность пород на одноосное растяжение; $F_{rate}(\dot{\epsilon})$ – функция скорости деформации, характеризующая динамическое упрочнение материала; $r_3(\theta)$ – функция, определяющая связь между прочностью на разрыв, вторым и третьим инвариантами девиатора тензора напряжений и гидростатическим давлением.

Результаты моделирования позволили наблюдать особенности поперечных волн в области сжатия воздушной полости. На рисунке 1, а видно, что детонационный фронт имеет некоторую кривизну до момента выхода на границу раздела ВВ/воздух, а массовая скорость продуктов детонации имеет поперечную составляющую, направленную к стенке (рисунок 1, б).

В данном случае кривизна определяется не слоем Харитона, неидеальностью ВВ или другими причинами, приведенными в [4], а геометрической постановкой задачи. Действительно, при точечном инициировании детонационный фронт имеет форму сферы, радиус которой равен расстоянию до точки инициирования. Рассмотрим, к чему может привести такая форма фронта, и как это повлияет на ударно-волновую картину в воздушном зазоре и окружающем скальном массиве.

Движение ДВ под некоторым углом к стенке скважины приводит к скачку давления из-за отражения ударной волны от стенок. Этот скачок давления способствует течению продуктов детонации

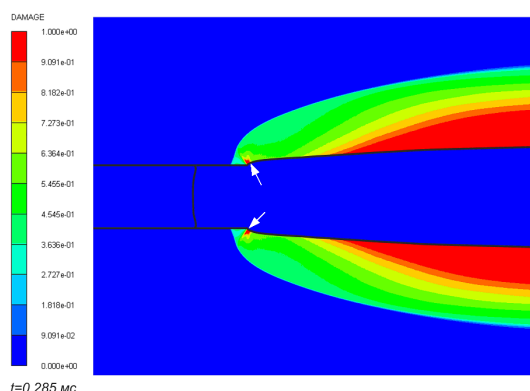


Рисунок 3 – Рождение трещин (отмечено белыми стрелками) в зоне скачка давления, вызванного отражением детонационной волны от стенки скважины на карте распределения вероятностей разрушения по расчетной области

вдоль стенок, что приводит к “выгибанию” контактной поверхности в обратную сторону (вблизи стенок) относительно начальной кривизны фронта детонации (см. рисунок 2).

На рисунке также видно, что после отрыва УВ от контактной поверхности из-за источников давления у стенок, рождается сходящаяся ударная волна, которая распространяется с большей скоростью у стенок, чем в середине скважины. В результате образуется характерная волновая конфигурация с двойным скачком давления на стенке. Двойной скачок давления должен больше влиять на разрушение породы, чем продольное движение ударной волны вдоль стенки, так как пульсации давления будут вызывать знакопеременные нагрузки в породе.

На рисунке 3 показана зона разрушения, образовавшаяся вследствие эффекта отражения детонационной волны от стенок скважины. Трещи-

ны образовались вследствие разгрузки в момент выхода детонационной волны в воздушный зазор. На рисунке показан момент, когда ударная волна ушла влево в воздушную полость, а контактная поверхность также заметно сместилась влево.

Рассмотрим процессы, происходящие вблизи торца воздушного промежутка, которые сопутствуют отражению ударной волны. Здесь можно выделить ряд интересных эффектов. Рассмотрим их подробнее.

Пристеночная область контактной поверхности значительно обгоняет центральную часть. Ударная волна приближается к торцу воздушного промежутка выгнутой в обратную сторону относительно начальной кривизны фронта детонационной волны (см. рисунок 4). Поэтому первое воздействие испытывают области торца близкие к стенкам скважины. Причина такой формы УВ описана выше.

На периферийной части торца происходит разрушение породы. Это является причиной появления областей разгрузки. После появления таких зон разгрузки распространение ударной волны влево по массиву приостанавливается.

При столкновении отраженной от торца ударной волны с контактной поверхностью продуктов детонации происходят два примечательных газодинамических события. Во-первых, в пристеночной зоне при скольжении воздуха за фронтом отраженной волны вдоль пристеночного слоя продуктов образуется газодинамическая неустойчивость Кельвина-Гельмгольца [7] (см. рисунок 5). Это приводит к сильной турбулизации и образованию множественных зон газа с переменными параметрами (составом, температурой и плотностью). Во-вторых, из-за разности скоростей и плотностей в центральной области скважины на контактной поверхности появляется неустойчивость Рэля – Тейлора [7] (см. рисунок 6).

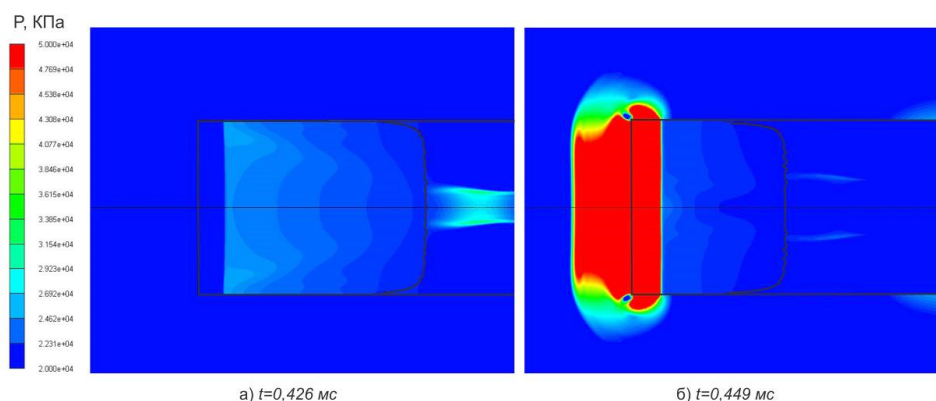


Рисунок 4 – Газодинамическая картина в моменты до (а) и после отражения УВ от торца воздушного зазора (б)

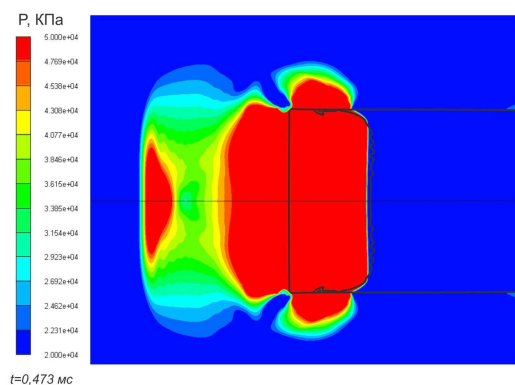


Рисунок 5 – Распределение давления в момент столкновения отраженной УВ с контактной поверхностью

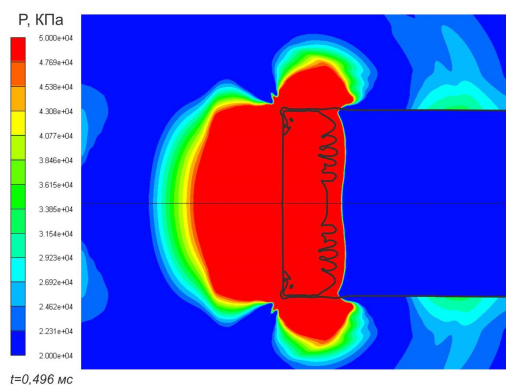


Рисунок 6 – Возникновение неустойчивости Рэлея–Тейлора на контактной поверхности

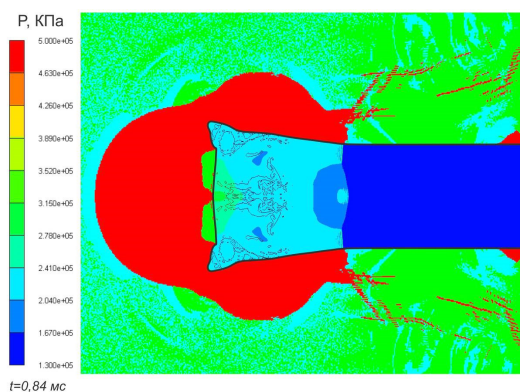


Рисунок 7 – Распределение давления в области Эйлеровой расчетной сетки и вероятности разрушения в области скальной породы (Лагранжевой сетки). Зеленый цвет – упругие деформации, циан – пластические, красный – разрушение

Таким образом, в области ограниченной торцом воздушного промежутка с одной стороны, и контактной поверхностью с другой, образуется среда, состоящая из чередующихся областей, заполненных воздухом, либо продуктами детонации. Поперечные и продольные ударные волны, проходя через множество областей с различным ударным импедансом, претерпевают множественные отражения и преломления, вследствие чего на стенки и торец скважины действуют множество импульсов давления, следующих с высокой частотой. Вероятно, это приводит к образованию множественных трещин в этой зоне. Таким образом, формирование начальной сетки трещин в области торца воздушного промежутка существенным образом зависит и контролируется трехмерной газо-

динамической картиной. Назовем эту зону торцевой вибрационной зоной разрушения. В качестве иллюстрации этой гипотезы, обратим внимание на рисунок 7, на котором показано распределение давления в области Эйлеровой сетки одновременно с распределением вероятностей разрушения в области Лагранжевой расчетной сетки.

На рисунке 7 видно, что на торце скважины образуются две характерные зоны разрушения: продольная у торца и поперечная вибрационная зона разрушения у стенок скважины, прилегающих к торцу. Обе зоны имеют характерные особенности. Первая зона практически не движется в направлении начального распространения ударной волны (влево на рисунке) вследствие разгрузки на границе стенок и торца скважины. Вторая зона контролируется той областью воздушного промежутка, газодинамическая картина которого допускает формирование множественных отражений ударной волны в различных направлениях. Примечательно, что напряжения в горном массиве в области торца скважины и в области заполнения скважины взрывчатым веществом взаимодействуют между собой, рождая магистральные трещины на всей длине воздушного промежутка.

Таким образом, численное моделирование позволило наглядно представить механизм действия воздушной подушки с учетом поперечных ударных волн и возникающей неустойчивости. Расчеты в двумерной постановке показали существенное влияние поперечных ударных волн на характер разрушения породы. В частности, показано, что:

- распространение фронта детонационной волны под некоторым углом, отличным от нормали к стенке скважины из-за естественной кривизны фронта детонационной волны в неидеально детонирующем ВВ, может приводить

к пульсациям давления в зоне взаимодействия фронта ДВ и продуктов детонации со стенкой скважины;

- возникающие на контактной поверхности между продуктами детонации и воздухом газодинамические неустойчивости различной природы являются причиной вибрационного воздействия на породу многократно отраженных и преломленных продольных и поперечных ударных волн;
- расчеты показали, что учет влияния поперечных волн и газодинамической неустойчивости позволяет оценить размеры зоны вибрационного воздействия на породу, а следовательно, и степень дробления в этой зоне. Из этого следует важный вывод: в случае подтверждения представленной гипотезы экспериментом для прогноза разрушения горной породы при применении рассредоточенных зарядов с воздушными промежутками, необходимо проводить двумерное моделирование газодинамической картины течения в воздушном зазоре;
- несмотря на упрощенную геометрию задачи, используемую в расчете, было показано существенное влияние двумерных явлений на картину разрушения.

Поэтому следующим шагом исследований будет трехмерное математическое моделирование, в котором будут учтены: возможные интерференционные явления, уравнения состояния для реального газа, кривизна детонационного фронта, характерная для промышленных ВВ, в практически используемых диаметрах зарядов.

Литература

1. *Нифадьев В.И.* Механизм действия воздушного промежутка скважинных зарядов / В.И. Нифадьев, В.А. Коваленко, М.А. Райымкулов, П.В. Комиссаров, С.С. Басакина // Вестник КPCУ. 2017. Т. 17. № 12. С. 170–174.
2. *Melnikov N.V.* Blasting methods to improve rock fragmentation / N.V. Melnikov, L.N. Marchenko, I.F. Zharikov, N.P. Seinov // Acta Astronautica. 1978. Vol. 5. P. 1113–1127.
3. *Lu W.* A further study on the mechanism of air decking / W. Lu, W. Hustrulid // International Journal For Rock Fragmentation by Blasting. 2003. Vol. 7. №4. P. 231–255.
4. *Андреев С.Г.* Теория критического диаметра детонации неидеальных взрывчатых веществ / С.Г. Андреев, И.А. Перевалов, М.М. Бойко, В.Ю. Клименко // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия “Машиностроение”. 2010. С. 172–181.
5. *Lee E.L.* Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives / E.L. Lee, C.M. Tarver // Physics of Fluids. 1980. Vol. 23. № 12. P. 2362–2372.
6. *Riedel W. et al.* Numerical assessment for impact strength measurements in concrete materials / W. Riedel et al. // Int. J. of Impact Eng. 2009. Vol. 36. № 2. P. 283–293.
7. *Лабунцов Д.А.* Механика двухфазных систем / Д.А. Лабунцов, В.В. Ягов. М.: Изд-во МЭИ, 2000. С. 143–146.