

УДК 622.235.5

МЕХАНИЗМ ДЕЙСТВИЯ ВОЗДУШНОГО ПРОМЕЖУТКА СКВАЖИННЫХ ЗАРЯДОВ

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

Влияние воздушных промежутков в скважинных зарядах на разрушение горной массы известно достаточно давно. Однако до сих пор нет ясного понимания механизма действия таких конструкций зарядов. Здесь представлена попытка качественного описания данного механизма.

Ключевые слова: рассредоточенный заряд; воздушный промежуток; дробление.

ON AIR-DECK BOREHOLE CHARGE MECHANISM

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

The effect of air-decking on rock fracturing is well known for reasonably long time. Nevertheless, an understanding of its acting mechanism is not still clear. In this paper an attempt to qualitatively describe of such mechanism is represented.

Keywords: distributed charge; air-decking; fracturing.

Введение. Эффект действия воздушного промежутка при взрыве отмечен давно. В работе Н.В. Мельникова [1] в 1940-х годах впервые была выдвинута идея управления взрывом путем применения зарядов, рассредоточенных воздушными промежутками. Затем эта идея была проработана детально в совместных работах Н.В. Мельникова и Л.Н. Марченко в 1960-х [2]. Принято считать, что применение воздушного промежутка в конструкции заряда приводит к снижению начального пикового давления взрыва в воздушной полости, увеличению времени действия взрыва на породу, а также взаимодействию ударных волн с продуктами детонации в полости взрыва. При этом, как утверждают исследования [2, 3], уменьшается доля энергии, затрачиваемой на бесполезное переизмельчение породы в ближней зоне, увеличивается время действия расширяющихся продуктов взрыва, улучшается проработка подошвы, снижается сейсмический эффект и т. д.

Качественное описание механизма действия воздушного промежутка приведено в работе [4]. Автор справедливо считает, что основной эффект возникает в результате сложного взаимодействия детонационных волн, воздушного промежутка и продуктов детонации. В момент выхода детона-

ционной волны на контактную поверхность между воздушным промежутком и продуктами детонации взрывчатого вещества (ПД), в область воздушного промежутка распространяются расширяющиеся ПД, сжимая воздух и увеличивая его температуру. При достижении фронтом ударной волны жесткой стенки (дна скважины), происходит ее отражение, приводящее к росту температуры и давления газа, что способствует возникновению повторного импульса давления. Предполагается, что величина повторного давления соизмерима с величиной давления в зарядной полости. Таким образом, воздушный промежуток может рассматриваться как источник формирования трещин в горной массе.

В работе [5] эффект воздушного промежутка объясняется существенным изменением процесса передачи энергии в горный массив в виде последовательных импульсов давления. Начальный момент взаимодействия ПД и воздушной полости характеризуется расширением ПД, значительным снижением пикового давления, сжатием воздуха, уменьшением удельной энергии ПД, передачей энергии от ПД в ударную волну (УВ) в воздухе. Отражившись от стенок полости, УВ меняет направление и взаимодействует с контактной поверхностью ПД–воздух. При этом УВ частично

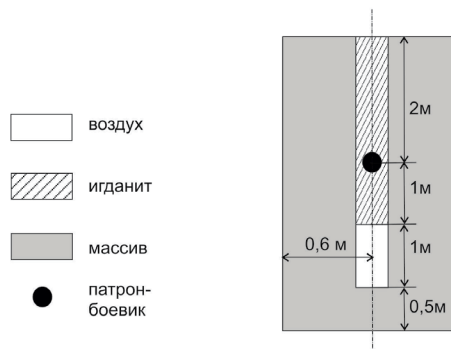


Рисунок 1 – Постановка задачи

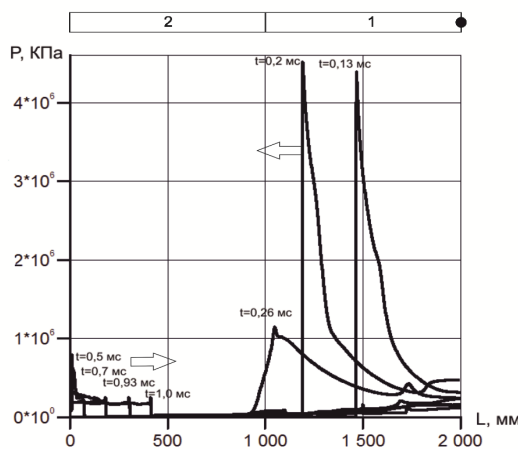


Рисунок 2 – Волновая картина при сжатии воздушной подушки:

1 – ПД, 2 – воздушный промежуток

отражается, а частично преломляется в ПД. В результате процесс передачи энергии в породу становится не мгновенным, а импульсивным.

Несмотря на высокий интерес промышленности к практическому применению воздушного промежутка в горном производстве, механизм его действия ограничивается упрощенным качественным описанием, в котором отсутствует удовлетворительное объяснение самого механизма действия и не учитываются размеры воздушного промежутка, свойства ВВ, физико-механические свойства горной породы и т. д. В связи с этим, остается открытым вопрос об оптимизации конструкции заряда для конкретной производственной задачи (снижения сейсмического эффекта взрыва, дробления горной массы, проработки подошвы и т. п.).

Для оценки влияния воздушного промежутка на разрушение породы можно использовать инструмент численного моделирования. Примерное

описание действия воздушного промежутка при взрыве методом численного моделирования подробно изложено в ряде работ [6, 7]. В данной статье рассматриваются некоторые газодинамические процессы в сжимаемом воздушном промежутке. В качестве примера рассмотрен воздушный промежуток, расположенный на дне скважины (т. н. воздушная подушка). Для моделирования взаимодействия воздушного промежутка с ПД, а также с расширяющимися и разрушаемыми стенками горного массива применялся пакет программ, состоящий из программного комплекса ANSYS AUTODYN, зарекомендовавшего себя в областях решения нестационарных задач нелинейной динамики [8], а также программного комплекса, разработанного сотрудниками Института коммуникаций и информационных технологий КРСУ (ИКИТ КРСУ), для оценки напряженно-деформированного состояния горных пород [9, 10].

Математическая модель. Газодинамические процессы в скважине в переменных Лагранжа (r, t) описываются уравнениями в виде [11]:

$$\frac{\partial V}{\partial t} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{R}{r} \right)^2 \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{2uV}{R} = 0,$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{R}{r} \right)^2 \frac{\partial p}{\partial r} = 0, \quad (1)$$

где p – давление вдоль скважины; ρ – плотность среды, u – массовая скорость ПД. Состояние ПД описывается уравнением Джонс-Уилкинсон-Ли:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega e_0 \rho_2}{V}, \quad (2)$$

где A, B, R_1, R_2, ω – постоянные величины для конкретного ВВ.

$$V = \frac{\rho_e}{\rho_{\gamma 2}},$$

где ρ_e – плотность ВВ; $\rho_{\gamma 2}$ – плотность продуктов взрыва; e_0 – удельная внутренняя энергия.

Модель поведения среды под действием взрывной нагрузки определяется законом откольного нагружения [10]:

$$\sigma_i \leq \sigma_p, \quad i=1, 2, 3, \quad (3)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения; σ_p – критическое напряжение. Если условие (3) не выполняется, то в элементе среды образуется трещина.

Постановка задачи. Рассматривалась двумерная осесимметричная задача. Геометрические размеры области приведены на рисунке 1. Деформации в горном массиве рассчитывались методом конечных элементов в лагранжевой постановке. Для вычисления распространения УВ и расширения

Таблица 1 – Параметры материалов

Игданит	Воздух (идеальный газ)	Горный массив
Плотность – 0,93 г/см ³ Скорость детонации – 4160 м/с Показатель политропы – 1,56 [12] Давление на фронте детонационной волны – 5,150*10 ⁶ кПа Теплота взрыва – 2,484*10 ⁶ кДж/м ³	Плотность – 1,2*10 ⁻³ г/см ³ Показатель адиабаты – 1,4 Внутренняя энергия – 2,068*10 ⁵ кДж/кг	Плотность – 2,75 г/см ³ Объемный модуль упругости – 3,5*10 ⁴ , МПа Модуль сдвига – 8,3*10 ³ , МПа Предел прочности на сжатие – 60 МПа Предел прочности на растяжение – 6,8 МПа

ПД в скважине применены эйлеровы сетки. Для лагранжевых сеток определены граничные условия импедансного типа.

В качестве ВВ был выбран игданит, параметры которого приведены в таблице 1. Воздушный промежуток длиной 1 м, расположенный на дне скважины, описывался моделью идеального газа. Патрон-боевик устанавливался на расстоянии 1 м от контактной поверхности ВВ–воздух. В расчетной задаче патрон-боевик был заменен точечным источником инициирования.

Горный массив моделировался слабым бетоном с предельной прочностью на сжатие – 60 МПа, что соответствует коэффициенту прочности по шкале Протодяконова $f = 6$ (см. таблицу 1).

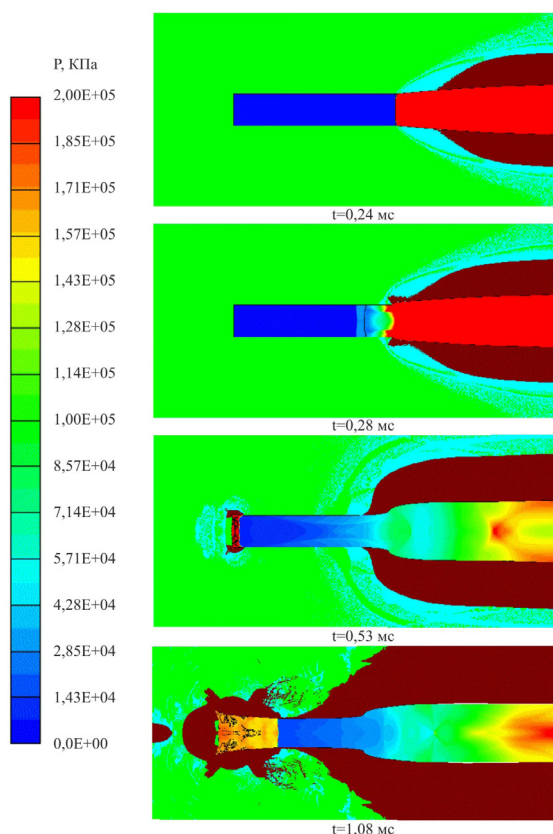


Рисунок 3 – Распределение давления вдоль оси скважины в различные моменты времени

Поведение системы рассчитывалось для промежутка времени от момента срабатывания патрона-боевика до 1,2 мс. Этот интервал соответствует времени достаточного для циркуляции УВ до торца скважины вдоль воздушного промежутка и обратно.

Результаты моделирования. На рисунке 2 представлены профили давления вдоль оси скважины от точки инициирования до торца скважины в различные моменты времени ($t = 0,1, 2$ мс). Распределение давления вдоль оси скважины в различные моменты времени показано на рисунке 3.

Как видно на рисунке 3, при достижении УВ контактной поверхности воздушной подушки и ПД, волна преломляется и распространяется по воздушному промежутку, сжимаемому продуктами взрыва. Отразившись от дна скважины, волна движется обратно в сторону контактной границы воздух–ПД.

На рисунке 4, а представлены записи давления в области дна скважины: пришедшая первая отраженная волна № 1 распространяется вдоль сжимаемого воздушного промежутка. Отразившись от контактной поверхности между ПД и воздухом, УВ увеличивает амплитуду и распространяется в сторону дна скважины. Отразившись от дна скважины формируется волна № 2 и последующие отраженные и преломленные волны (№ 3–№ 6).

На рисунке 5 представлено поведение УВ в области сжимаемого воздушного промежутка. Кривая на рисунке 5, а соответствует моменту удара преломленной в воздухе волны о дно скважины и действию импульса № 1 на рисунке 4, а. Импульсы № 2 и № 3 на рисунке 4, а соответствуют ударам о дно скважины волны, отраженной от контактной поверхности ПД–воздух. Также эти импульсы видны на рисунке 5, в, д. Как показывает моделирование, при многократных отражениях ударных волн от дна скважины и контактной поверхности, формируются волны сжатия, распространяющиеся по ПД.

В результате интерференционных процессов во взрывных волнах в области ПД рождается направленная волна сжатия, обеспечивающая усиленное действие на дно скважины. Эта волна соответствует импульсам № 7–10 на рисунке 4, а.

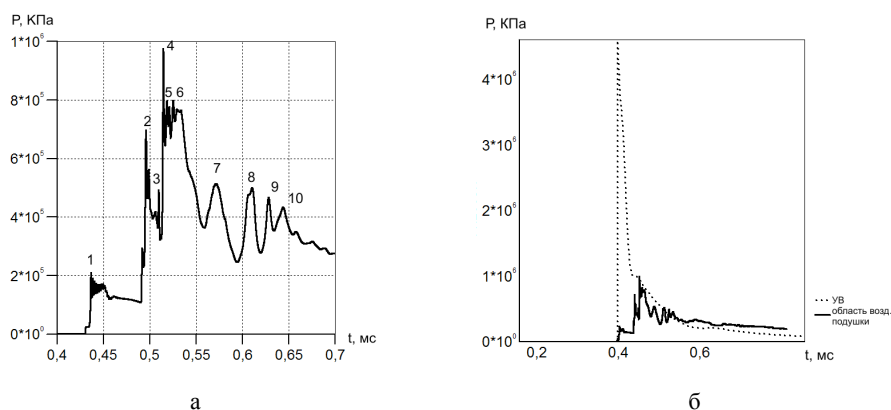


Рисунок 4 – Давление в области дна скважины (а); сравние совмещенных по времени профилей давления отраженной и падающей УВ (б)

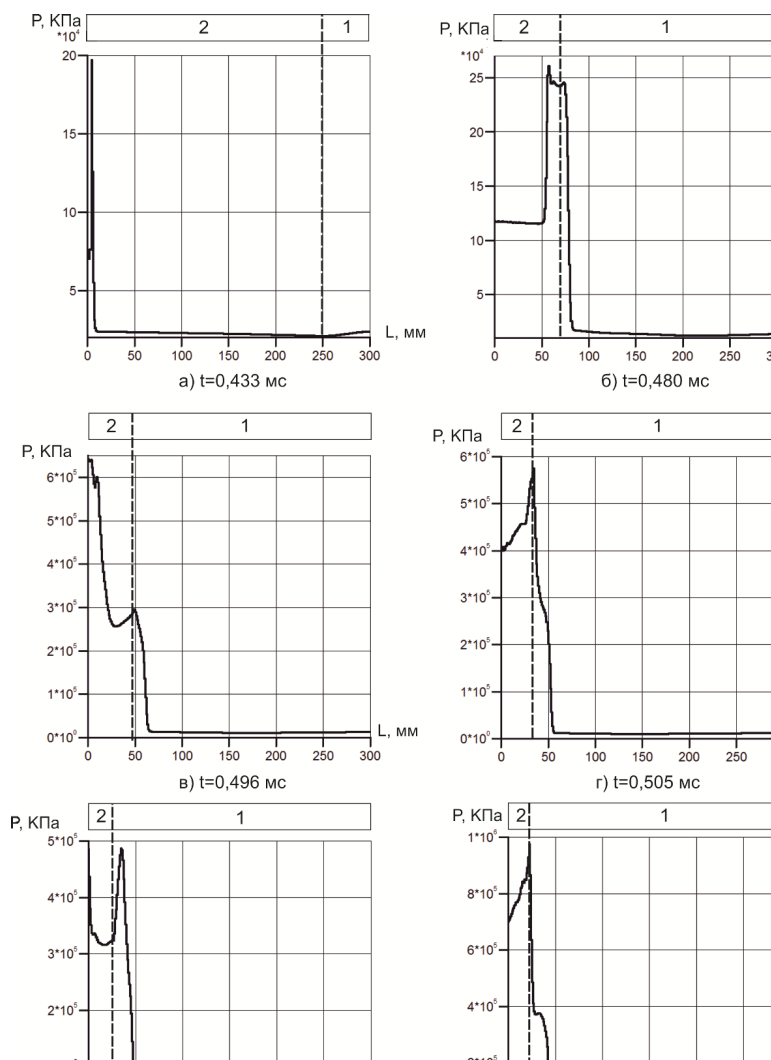


Рисунок 5 – Распределение давления вдоль оси скважины в различные моменты времени: 1 – ПД, 2– воздушный промежуток

С течением времени, колебательный процесс затухает и на дне скважины устанавливается равномерное распределение давления (см. рисунок 3).

Выделим основные этапы действия воздушной подушки: 1) сжатие воздуха продуктами взрыва, 2) многократное отражение преломленной волны от границ в области сжимаемого воздушного промежутка, 3) формирование вторичной УВ, 4) перемешивание продуктов детонации и воздушного промежутка, 5) интерференция отраженных волн и формирование направленной волны сжатия, действующей на дно скважины.

Таким образом, газодинамические процессы в сжатом воздушном слое могут являться причиной формирования в породе начальной сети трещин.

Выводы. Численное моделирование позволило наглядно представить механизм действия воздушной подушки. Как показывают результаты, пиковые значения давления действительно значительно снижаются в области воздушного промежутка за счет взаимодействия детонационных волн с воздухом в воздушной подушке, а время действия увеличивается. В результате многократного отражения преломленной УВ от подвижных границ породы, воздуха и контактной поверхности, в тонком слое сжатого воздуха возникает источник начальной сети трещин в горной массе.

Как известно, применение воздушных промежутков затруднено усложнением процесса заряжания и забойки скважин. Однако современные технологии автоматизированного заряжания дают надежду на скорое широкое применение воздушных промежутков в случае, если количественно и качественно будет показана эффективность их применения, в том числе с помощью современных методов численного моделирования.

Литература

1. Мельников Н.В. Использование энергии взрывчатых веществ и кусковатость пород при взрывных работах / Н.В. Мельников // Горный журнал. 1940. № 5–6. С. 61–64.
2. Мельников Н.В. Энергия взрыва и конструкция заряда / Н.В. Мельников, Л.Н. Марченко. М.: Недра, 1964. 138 с.
3. Нифадьев В.И. Управление разрушением горных пород на основе регулирования энергетических и детонационных характеристик ВВ: автореф. дис... д-ра техн. наук / В.И. Нифадьев. М., 1993. 39 с.
4. Жунусов К. Отбойка скальных пород зарядами с воздушной подушкой / К. Жунусов Алма-Ата: Наука. 1979. С. 23–89.
5. Жариков И.Ф. Эффективность разрушения горных пород зарядами различных конструкций / И.Ф. Жариков // Взрывное дело. 1986. № 89. Т.46. С. 31–42.
6. Abdalla M.A. Advanced understanding of the mechanism of air-deck blasting: A numerical approach / M.A. Abdalla, P. Hagan, D. Chalmers // Rock Fragmentation by Blasting, FRAGBLAST 10: Proceedings of the 10th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. New Delhi, India, 2012. P. 391–396.
7. Jhanwar J.C. Theory and Practice of Air-Deck Blasting in Mines and Surface Excavations: A Review / J.C. Jhanwar // Geotechnical and Geological Engineering. 2011. № 29. P. 651–663.
8. Прис Д. Использование ANSYS AUTODYN для оптимизации процесса взрывных работ в горной промышленности / Д. Прис // ANSYS Advantage: Русская ред. инж.-технич. журн., 2010. № 14. С. 13–14.
9. Коваленко В.А. Сравнительный анализ сейсмического воздействия взрывных работ на карьере на подземные горные выработки методом численного моделирования / В.А. Коваленко, М.А. Райымкулов, Д.А. Воробьев // Вестник КPCY. 2015. Т. 15. № 3. С. 116–119.
10. Коваленко В.А. О численном моделировании разрушения горных пород динамическим нагружением / В.А. Коваленко, В.В. Григорьев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. АН СССР, Сибирское отделение. 1991. № 5. С. 71–77.
11. Коваленко В.А. Расчет параметров взрывных волн в плотных средах при различных схемах детонации / Е.Г. Баранов, В.А. Коваленко, Е.А. Коваленко, Г.М. Ляхов // Журнал прикладной механики и технической физики, АН СССР, Сибирское отделение. 1980. № 1. С. 133–140.
12. Дубнов Л.В. Промышленные взрывчатые вещества / Л.В. Дубнов, Н.Р. Бахаревич, А.И. Романов. М.: Недра, 1988. 358 с.