

ПОПЕРЕЧНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ВОЗДУШНОМ ПРОМЕЖУТКЕ ПРИ ВЗРЫВЕ СЕГМЕНТА РАССРЕДОТОЧЕННОГО СКВАЖИННОГО ЗАРЯДА

П. В. Комиссаров¹, В. И. Нифадьев², В. А. Коваленко³, М. А. Райымкулов⁴,
С. С. Басакина⁵

Аннотация: Технология рассредоточения воздушными промежутками скважинных зарядов довольно часто применяется при проведении буровзрывных работ с целью снижения бризантного действия зарядов и обеспечения более равномерного дробления и проработки подошвы уступа. Объяснение влияния воздушных промежутков сводится к более выгодному распределению энергии взрыва за счет разгрузки продуктов детонации (ПД) в воздушные промежутки и образованию продольных пульсаций в воздушных полостях. Представлена также попытка объяснения возникновения влияния поперечных волн в воздушных промежутках на разрушение горной породы.

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

DOI:

В качестве объяснения действия воздушных промежутков при буровзрывных работах с использованием рассредоточенных зарядов с середины прошлого века, начиная с работ Мельникова с коллегами [1], используют одномерные подходы. Например, в [2], используя теорию ударных труб, авторы приходят к выводу, что многократные продольные отражения ударных волн (УВ) в воздушных промежутках являются основной причиной рождения зародышей трещин в горной породе. Кроме того, волны разгрузки являются причиной растягивающих напряжений в породе.

Несмотря на всю простоту аналитического описания процессов в рассредоточенном воздушными промежутками заряде при помощи теории ударных труб, одномерный подход имеет значительный недостаток, а именно: он не предусматривает влияния поперечных ударно-волновых возмущений. Однако такие возмущения заведомо появляются при взрывах реальных зарядов по ряду причин, в том числе из-за:

- неровностей стенок скважины, способствующих множественным отражениям УВ;
- невозможности обеспечения симметричного положения боевика на оси заряда;

- кривизны детонационного фронта в промышленных взрывчатых веществах (ВВ) [3];
- локальных зон разгрузки давления, связанных с образованием трещин в породе;
- источников вторичных УВ. Действительно, принимая во внимание, что скорость звука в породе чаще всего выше скорости детонации промышленных ВВ и, одновременно, значительно выше скорости звука в воздухе, заполняющего промежутки, стенки скважины сами могут являться источниками вторичных волн;
- всевозможных газодинамических неустойчивостей потока, образующихся как на фронте УВ, так и в других областях движущегося газа.

Проведены расчеты в двумерной постановке с осевой симметрией в программе «ANSYS AUTODYN Академический».

Задача сформулирована следующим образом:

- расчетная геометрия имеет вид, показанный на рис. 1. Таким образом, моделируется ситуация, возникающая при наиболее часто встречающемся на практике случае использования воздушных полостей в колонке заряда —

¹ Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, kr_899@yahoo.com

² Кыргызско-Российский славянский университет (КРСУ), Бишкек, Кыргызстан, krsu@krsu.edu.kg

³ Институт коммуникаций и информационных технологий Кыргызско-Российского славянского университета (КРСУ), Бишкек, Кыргызстан, kovalenko@istc.kg

⁴ Кыргызско-Российский славянский университет (КРСУ), Бишкек, Кыргызстан, rmarat@istc.kg

⁵ Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», basakina.s@mail.ru

- воздушный промежуток расположен на дне скважины и обеспечивает лучшую проработку подошвы, одновременно позволяя избежать переизмельчения горной массы. Более сложные для моделирования случаи, в которых детонационный импульс передается между несколькими зарядами, разделенными воздушными промежутками, либо используется короткозамедленное взрывание нескольких рассредоточенных зарядов, будут рассмотрены в дальнейшем;
- в качестве ВВ в расчете используется идганит со следующими параметрами: начальная плотность $0,93 \text{ г/см}^3$; скорость детонации 4160 м/с ; показатель политропы $1,56$; давление на фронте детонационной волны (ДВ) $5,150 \text{ ГПа}$; теплота взрыва $2,484 \text{ ГДж/м}^3$;
- в расчетах использовалось уравнение состояния (УрС) ПД в форме Джонса–Уилкинса–Ли (JWL) [4]

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega \epsilon_0 \rho_e}{V}.$$

Здесь $V = \rho_e / \rho_{\text{пв}}$, где ρ_e — плотность ВВ, $\rho_{\text{пв}}$ — плотность продуктов взрыва; ϵ_0 — удельная внутренняя энергия; A, B, R_1, R_2 и ω — постоянные величины для заданного ВВ. Коэффициенты УрС заданы следующим образом: $A \approx 49 \text{ ГПа}$; $B \approx 1,89 \text{ ГПа}$; $R_1 \approx 3,9$; $R_2 \approx 1,12$; $\omega \approx 0,333$ и $\epsilon_0 \approx 2,484 \text{ ГПа/м}^3$;

- в использованной программе ANSYS AUTODYN кинетика разложения ВВ описывается моделью Ли–Тарвера, в которой для твердого (сплошного) ВВ используется модель УрС JWL, а газообразные продукты расширения описываются УрС JWL со скоростью реакции, полученной в [5]. Подробнее модель, используемая в ANSYS AUTODYN, рассмотрена в работах [6–9];

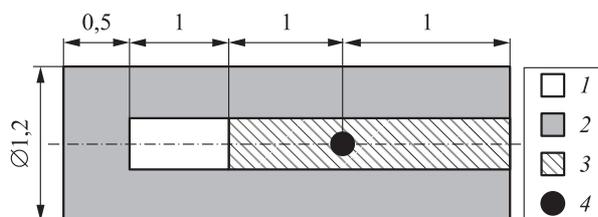


Рис. 1 Геометрия расчетной задачи: 1 — воздух; 2 — горный массив; 3 — идганит; 4 — патрон-боевик. Размеры указаны в метрах

- для описания поведения горной породы принята модель Риделя–Тома–Хермайера (RHT Concrete Material Model). Подробное описание модели изложено, например, в статьях [10–12]. При этом модель горной породы имела следующие параметры: плотность — $2,75 \text{ г/см}^3$; объемный модуль упругости — 35 ГПа ; модуль сдвига — $8,3 \text{ ГПа}$; предел прочности на сжатие — 60 МПа ; предел прочности на растяжение — $6,8 \text{ МПа}$;
- в качестве условия прочности используется критерий, предложенный для бетона [11, 13];
- в качестве УрС воздуха использовалось уравнение состояния идеального газа:

$$p = (\gamma - 1) \rho \epsilon,$$

где $\gamma = 1,4$ — показатель адиабаты, $\epsilon = 2,068 \cdot 10^5 \text{ кДж/кг}$ — внутренняя энергия воздуха, $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$.

Произведенные двумерные расчеты на достаточно мелких сетках (с размером ячейки 1 мм) дают возможность наблюдать часть вышеуказанных поперечных волновых эффектов. На рис. 2, а видно, что детонационный фронт имеет некоторую кривизну до момента выхода на границу раздела ВВ/воздух, а вектор массовой скорости ПД обладает поперечной составляющей, направленной в стенку (см. рис. 2, б). В этой ситуации кривизна определяется не слоем Харитона, неидеальностью ВВ или другими причинами, отмеченными в [3], а геометрической постановкой задачи. Действительно, при точечном инициировании детонационный фронт имеет форму сферы, радиус которой равен расстоянию до точки инициирования. Проанализируем, как влияет такая форма фронта на газодинамические процессы движения УВ области воздушного промежутка и окружающем горном массиве.

Движение ДВ под некоторым углом к стенке скважины является причиной скачка давления в результате отражения от стенок. Этот скачок давления способствует течению ПД вдоль стенок с большей скоростью, из-за чего происходит «выгибание» контактной поверхности в обратную сторону относительно направления начальной кривизны поверхности ДВ (рис. 3).

На рис. 3 видно, что после отрыва УВ от контактной поверхности у стенок рождается сходящаяся к центру скважины осесимметричная УВ, распространяющаяся с большей скоростью у стенок, чем в середине скважины. Таким образом, у движущейся вдоль стенки по воздушному промежутку УВ появляется поперечная составляющая вектора скорости. Как результат, на стенке скважины образуется характерная волновая конфигурация с двойным

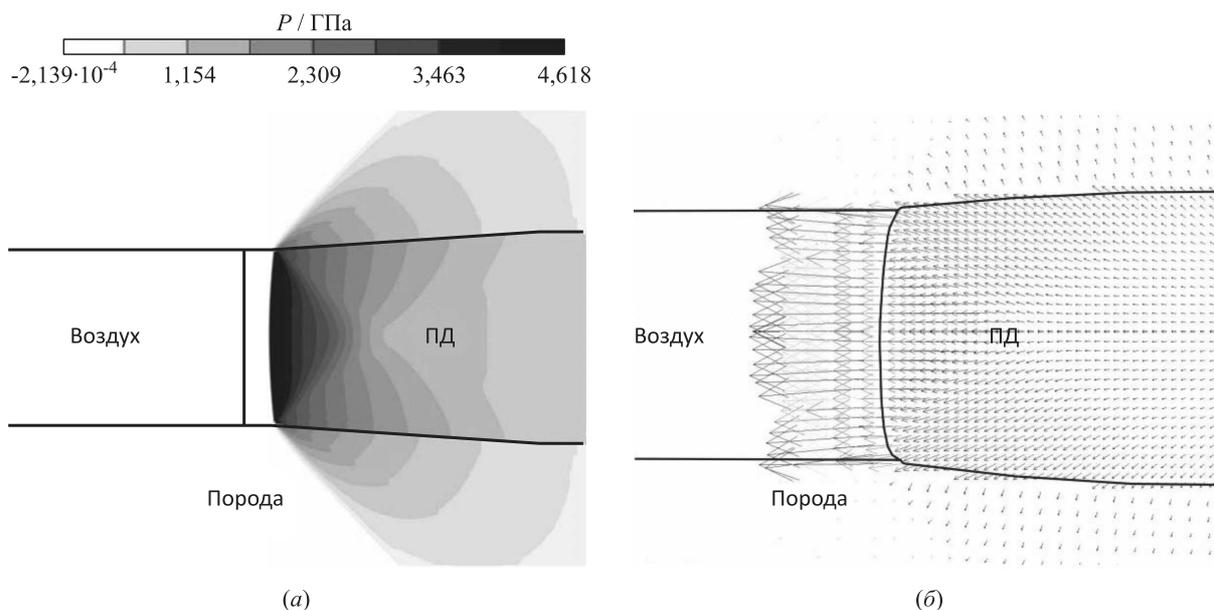


Рис. 2 Распределение давления до момента выхода ДВ на границу раздела ВВ/воздух ($t = 0,227$ мс) (видна близкая к сферической форма детонационного фронта) (а) и вектора массовой скорости в области контакта ДВ со стенкой скважины на фоне карты распределения материала ($t = 0,244$ мс) (б)

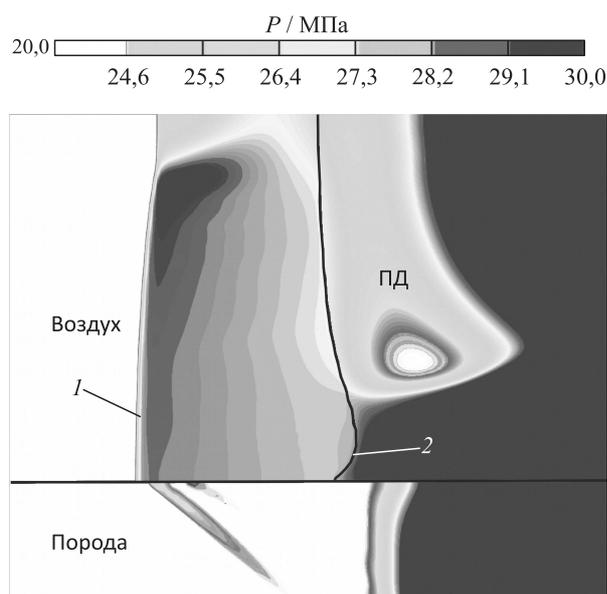


Рис. 3 Распределение давления в воздухе и ПД в момент после отрыва УВ от контактной поверхности ($t = 0,284$ мс): 1 — сходящаяся УВ; 2 — «выгибание» контактной поверхности

скачком давления. Первый скачок соответствует отражению ведущей УВ от стенки, а второй — взаимодействию со стенкой косых УВ, следующих за ведущей УВ. Такой скачок давления должен в большей степени влиять на разрушение породы, нежели одномерное движение УВ вдоль стенки, из-за того

что пульсации давления будут вызывать знакопеременные нагрузки в породе.

Далее на контактной поверхности, из-за разности скоростей и плотностей в центральной области скважины, возникает неустойчивость Рэлея—Тейлора [14] (рис. 4). На рисунке для момента времени 0,48 мс видно, что контактная поверхность сильно искривлена вследствие неустойчивости. Отметим этот факт, так как он будет иметь значительное влияние на процессы в воздушном промежутке после отражения УВ от торца.

Рассмотрим теперь процессы, происходящие около торца воздушного промежутка при отражении УВ. Здесь можно выделить ряд любопытных эффектов.

Пристеночная область контактной поверхности существенно обгоняет центральную часть. Это также видно на рис. 4. Ударная волна подходит к торцу воздушного промежутка выгнутой в обратную сторону относительно начальной кривизны фронта ДВ. По этой причине первыми подвергаются воздействию области торца, близкие к стенкам скважины.

Разрушение породы происходит на периферийной части торца скважины. Разрушение есть причина появления областей разгрузки в породе. После появления таких зон разгрузки распространение УВ влево по массиву замедляется.

Два газодинамических события происходят при столкновении отраженной от торца УВ с контактной поверхностью ПД. У стенок скважины при

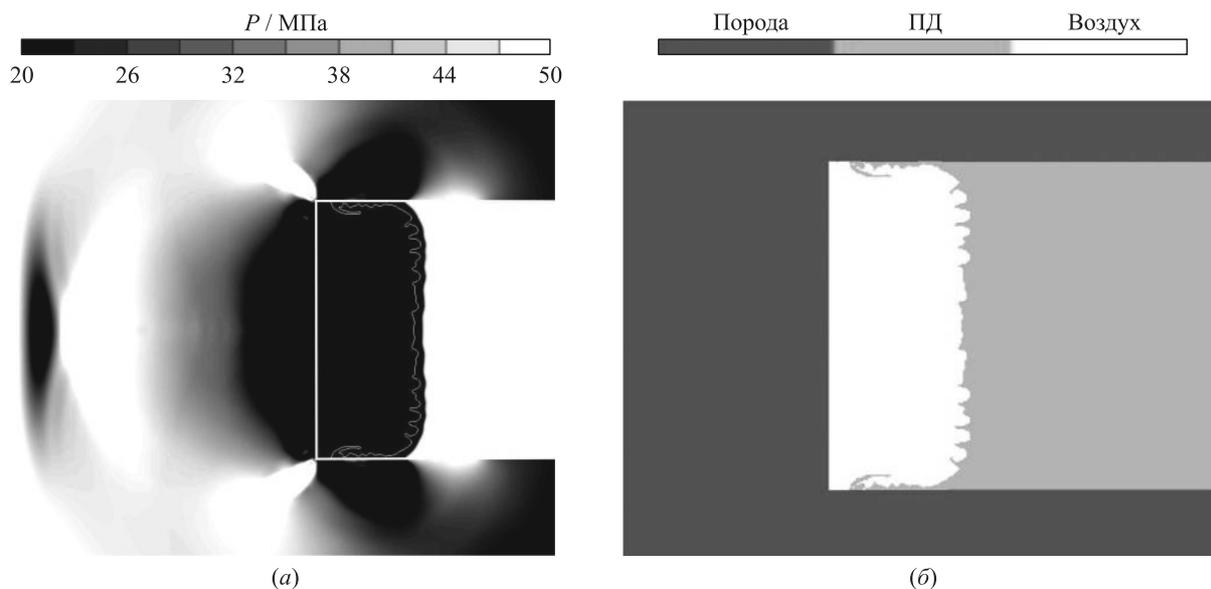


Рис. 4 Возникновение неустойчивости Рэля–Тейлора на контактной поверхности: (а) карта давления; (б) положение материалов (воздух, ПД, порода) для момента времени 0,48 мс после инициирования

движении фронта отраженной волны вдоль пристеночного слоя продуктов возникает газодинамическая неустойчивость Кельвина–Гельмгольца [14], связанная с большой разностью скоростей течения. Это провоцирует сильную турбулизацию и образование множественных вихревых зон с переменными параметрами (составом, температурой и плотностью). Неустойчивость Рэля–Тейлора также продолжает развиваться в центре скважины вследствие разности скоростей и плотностей (см. рис. 4).

Следовательно, в области, ограниченной торцом воздушного промежутка, с одной стороны, и контактной поверхностью, с другой, возникает среда, состоящая из чередующихся зон, заполненных воздухом либо ПД (рис. 5). Поперечные и продольные УВ, проходя через множество областей с различным ударным импедансом, претерпевают множественные отражения и преломления, вследствие чего на стенки и торец скважины воздействуют множество импульсов давления, следу-

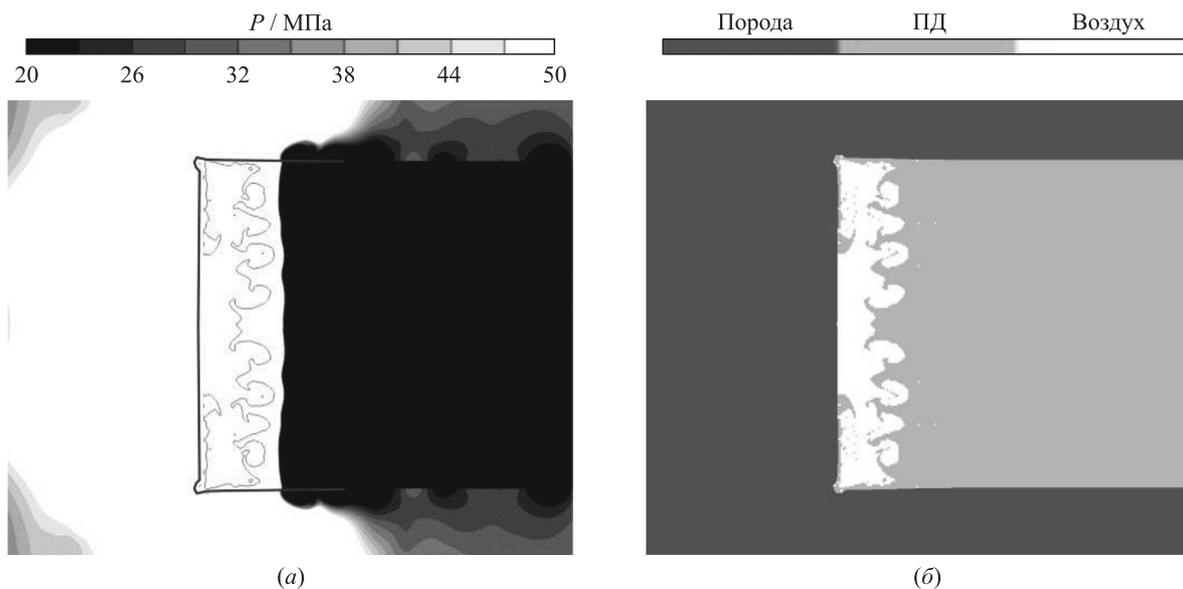


Рис. 5 Формирование вихревой зоны в воздушном зазоре: (а) карта давления; (б) положение материалов (воздух, ПД, порода) для момента времени 0,513 мс после инициирования

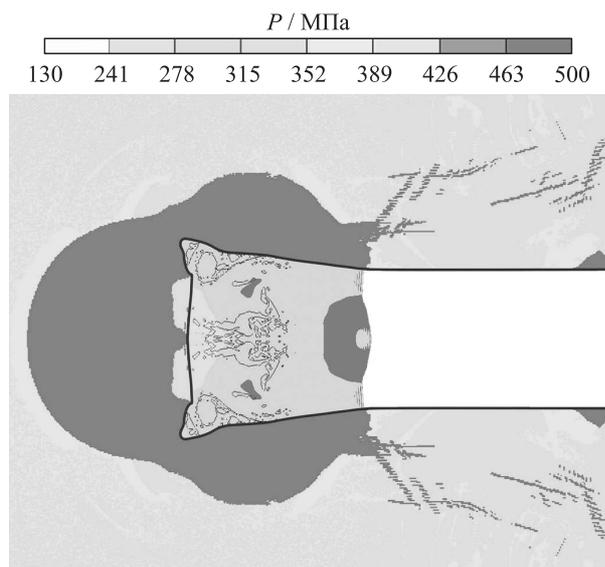


Рис. 6 Распределение давления в области Эйлеровой расчетной сетки и вероятности разрушения в области скальной породы (Лагранжевой сетки): светло-серый цвет в области породы — упругие деформации; серый — пластические (389–426 МПа); темно-серый — разрушение

ющих с высокой частотой. Вероятно, это может привести к образованию множественных начальных трещин в этой зоне. Поэтому можно сделать предположение, что формирование начальной сети трещин в горной породе в области торца воздушного промежутка существенно зависит от поперечных волновых эффектов в воздушном промежутке. В качестве наглядного примера в пользу этой гипотезы рассмотрим рис. 6, на котором показано распределение давления в области Эйлеровой сетки (в газе) одновременно с распределением вероятностей разрушения в области Лагранжевой расчетной сетки (в породе). «Вероятность разрушения» — это внутренний параметр в AUTODYN, который удобно использовать для графического вывода с целью демонстрации трещин в породе. Там, где этот параметр равен единице, образованы трещины (черный цвет на рисунке). На рисунке видно, что на торце скважины возникают две характерные зоны разрушения: продольная у торца и поперечная вибрационная зона разрушения у стенок скважины, прилегающих к торцу. Эти зоны имеют характерные особенности. Первая из них практически не движется в направлении начального распространения УВ (влево на рисунке) из-за разгрузки на границе стенок и торца скважины. Другая зона контролируется той областью воздушного промежутка, газодинамическая картина которого допускает формирование множественных отражений УВ и движение множества волн в различных направ-

лениях. Любопытно, что напряжения в скальном массиве в области торца скважины и в области заполнения скважины ВВ взаимодействуют между собой, создавая магистральные трещины на всей длине воздушного промежутка.

Выводы. Численное моделирование дало возможность наглядно воссоздать механизм действия воздушного промежутка на горную породу с учетом действия поперечных УВ и возникающих газодинамических неустойчивостей различного типа. Расчеты в двумерной постановке продемонстрировали значительное воздействие поперечных УВ на характер разрушения породы. В частности, показано, что:

- распространение фронта ДВ под некоторым углом, отличным от нормали к стенке скважины, вследствие естественной кривизны фронта может приводить к пульсациям давления в зоне взаимодействия фронта ДВ и ПД со стенкой скважины;
- явления газодинамической неустойчивости различного типа, сопровождающие движение УВ и контактной поверхности в воздушном промежутке, являются возможной причиной вибрационного воздействия на породу многократно отраженных и преломленных продольных и поперечных УВ.
- проведенные расчеты позволяют оценить размеры зоны вибрационного воздействия на породу, а значит, и степень дробления в этой зоне. Из этого следует важный вывод: в случае подтверждения изложенной гипотезы экспериментом необходимо проводить двумерное моделирование газодинамической картины течения в воздушном зазоре при проектировании промышленного взрыва с использованием рассредоточенных зарядов с целью оптимизации расхода ВВ и во избежание переизмельчения породы в некоторых областях горного массива, подвергающегося воздействию.

Авторы ни в коей мере не претендуют на полное соответствие наблюдаемых в расчете газодинамических процессов реальным процессам в скважине, однако важно отметить, что поперечные компоненты УВ могут существенно изменить картину разрушения.

Литература

1. Melnikov N. V., Marchenko L. N., Zharikov I. F., Seinov N. P. Blasting methods to improve rock fragmentation // Acta Astronaut., 1978. Vol. 5. P. 1113–1127.

- Lu W., Hustrulid W. A further study on the mechanism of air decking // *Int. J. Rock Fragmentation Blasting*, 2003. Vol. 7. No. 4. P. 231–255.
- Андреев С. Г., Перевалов И. А., Бойко М. М., Клименко В. Ю. Теория критического диаметра детонации неидеальных взрывчатых веществ // *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2010. № 5. С. 172–181.
- Физика взрыва: В 2 т. / Под ред. Л. П. Орленко. — 3-е изд., перераб. — М.: Физматлит, 2002. Т. 2. 656 с.
- Tarver C. M., Hallquist J. O., Erickson L. M. Modeling short pulse duration shock initiation of solid explosives // *8th Symposium (International) on Detonation Proceedings*, 1985. P. 65.
- Autodyn: Explosive initiation users manual (Lee–Tarver ignition and growth). Century Dynamics, 2005.
- ANSYS training manual. ANSYS, Inc., 2009.
- Price M. A., Gee A. H. Modeling for detonation and energy release from peroxides and non-ideal explosives // *Cent. Eur. J. Energ. Mat.*, 2009. Vol. 6. No. 3–4. P. 239–254.
- ANSYS Autodyn User’s Manual. Release 17.2. ANSYS, Inc., 2016.
- Riedel W. Beton unter dynamischen Lasten. Meso- und makromechanische Modelle und ihre Parameter. Fraunhofer IRB Verlag, 2004. 220 p.
- Riedel W., Kawai N., Kondo K. Numerical assessment for impact strength measurements in concrete materials // *Int. J. Impact Eng.*, 2009. Vol. 36. No. 2. P. 283–293.
- ANSYS® AUTODYN® x64. Release 16.1. ANSYS Inc., 2016.
- Luccioni B., Aráoz G. Erosion criteria for frictional materials under blast load // *Mecánica Computacional*, 2011. Vol. XXX. No. 21. P. 1809–1831.
- Лабунцов Д. А., Ягов В. В. Механика двухфазных систем. — М.: Изд-во МЭИ, 2000. С. 143–146.

Поступила в редакцию 01.02.18

TRANSVERSE EFFECTS IN AIR GAP OF AIR-DECKING BOREHOLE CHARGE SEGMENT EXPLODED

P. V. Komissarov¹, V. I. Nifadev², V. A. Kovalenko², M. A. Raiymkulov², and S. S. Basakina^{1,3}

¹N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation

²Kyrgyz-Russian Slavic University, Bishkek, Kyrgyz Republic

³National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation

Abstract: Air-decking is a common technique to enhance the rock fracturing. However, the explanation of the effect is reduced to such hypotheses as 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

DOI:

References

- Melnikov, N. V., L. N. Marchenko, I. F. Zharikov, and N. P. Seinov. 1978. Blasting methods to improve rock fragmentation. *Acta Astronaut.* 5:1113–1127.
- Lu, W., and W. Hustrulid. 2003. A further study on the mechanism of air decking. *Int. J. Rock Fragmentation Blasting* 7(4):231–255.
- Andreev, S. G., I. A. Perevalov, M. M. Boiko, and V. Yu. Klimenko. 2010. Teoriya kriticheskogo diametra detonatsii neideal’nykh vzryvchatykh veshchestv [Theory of the critical diameter of detonation of nonideal detonation]. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Mechanical Engineering* S:172–181.
- Orlenko, L. P., ed. 2002. *Fizika vzryva* [Physics of explosion]. 3rd ed. Moscow: Fizmatlit. Vol. 2. 656 p.
- Tarver, C. M., J. O. Hallquist, and L. M. Erickson. 1985. Modeling short pulse duration shock initiation of solid explosives. *8th Symposium (International) on Detonation Proceedings*. 65.
- Century Dynamics. 2005. Autodyn: Explosive initiation users manual (Lee–Tarver ignition and growth).
- ANSYS, Inc. 2009. ANSYS training manual.
- Price, M. A., and A. H. Gee. 2009. Modeling for detonation and energy release from peroxides and non-ideal explosives. *Cent. Eur. J. Energ. Mat.* 6(3–4):239–254.

9. ANSYS, Inc. 2016. ANSYS Autodyn User's Manual. Release 17.2.
10. Riedel, W. 2004. Beton unter dynamischen Lasten. Meso- und makromechanische Modelle und ihre Parameter. Fraunhofer IRB Verlag. 220 p.
11. Riedel, W., N. Kawai, and K. Kondo. 2009. Numerical assessment for impact strength measurements in concrete materials. *Int. J. Impact Eng.* 36(2):283–293.
12. ANSYS Inc. 2016. ANSYS® AUTODYN® x64. Release 16.1.
13. Luccioni, B., and G. Aráoz. 2011. Erosion criteria for frictional materials under blast load. *Mecánica Computacional* XXX(21):1809–1831.
14. Labuntsov, D. A., and V. V. Yagov. 2000. *Mekhanika dvukhfaznykh sistem* [Mechanics of two-phase systems]. Moscow: MPEI Publs. 143–146.

Received February 1, 2018

Contributors

Komissarov Pavel V. (b. 1974) — Candidate of Science in physics and mathematics, senior research scientist, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; kr_899@yahoo.com

Nifadev Vladimir I. (b. 1947) — Doctor of Science in technology, professor, Academician of the National Academy of Sciences of Kyrgyz Republic, director, Kyrgyz-Russian Slavic University, Bishkek, Kyrgyz Republic; krsu@krsu.edu.kg

Kovalenko Vitaly A. (b. 1940) — Candidate of Science in technology, director, Institute of Communications and Informatics Technologies, Kyrgyz-Russian Slavic University, Bishkek, Kyrgyz Republic; kovalenko@istc.kg

Raiymkulov Marat A. (b. 1984) — junior research scientist, Kyrgyz-Russian Slavic University, Bishkek, Kyrgyz Republic; rmarat@istc.kg

Basakina Svetlana S. (b. 1996) — engineer, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; engineer, National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; basakina.s@mail.ru