

УДК 622.236.4

DOI: 10.25635/2313-1586.2018.02.082

Камянский Виктор Николаевич
аспирант,
Горный институт КНЦ РАН,
184209, Апатиты, Ферсмана, 24
e-mail: kamyanski@goi.kolasc.net.ru

Kamyansky Viktor N.
PhD student,
Mining Institute of KSC RAS,
184209, Apatity, Fersman st., 24
e-mail: kamyanski@goi.kolasc.net.ru

ОЦЕНКА СЕЙСМОВЗРЫВНЫХ НАГРУЗОК ПРИ РАЗДЕЛКЕ ОТРЕЗНОЙ ЩЕЛИ

ESTIMATION OF SEISMIC LOADS AT PRE-SPLIT BLASTING

Аннотация:

На основе результатов численного моделирования изучен процесс формирования отрезной щели при взрывании контурных зарядов с воздушным и водяным промежутком. Исследовано поле действующих радиальных и тангенциальных напряжений в ближней зоне взрыва. Показано, что при разделке отрезной щели возможно нарушение сплошности массива на расстоянии до 5 м от щели. Дана оценка экранирующего действия сформированной отрезной при взрывании зарядов приконтурного блока.

Abstract:

Based on results of numerical simulation the process of forming pre-split cracks at blasting of contour boreholes with different (air and water) gap has been studied. The radial and tangential stress field at the near zone of explosion has been investigated. It is shown, that when pre-split blasting method is used, the zone of discontinuity of the rock mass can achieve 5 meters at the direction of rock massive. The shielding effect of the pre-split blasting has been evaluated.

Ключевые слова: численное моделирование, метод конечных элементов, разрушение горных пород, взрыв, контурное взрывание, предварительное щелеобразование

Keywords: numerical simulation, finite element method, rock failure, blast, contour blasting, pre-split blasting

Введение

На крупных горных предприятиях, отрабатывающих запасы полезных ископаемых открытым способом, весьма остро стоят вопросы обеспечения устойчивости откосов уступов в рабочем состоянии. Одним из главных факторов, отрицательно сказывающихся на устойчивости откосов уступов, являются высокие сейсмозрывные нагрузки, возникающие в результате взрывной отбойки массива.

Основным способом, снижающим сейсмическое действие взрывов, является применение специальных методов контурного взрывания, главным образом, метода предварительного щелеобразования. Данный способ также является основным при постановке бортов карьеров в конечное положение. Суть метода заключается во взрыве в ненарушенном массиве близко расположенных скважин малого диаметра, расположенных параллельно друг другу в плоскости, соответствующей проектной поверхности откоса уступа в его конечном положении. После взрыва зарядов в массиве образуется щель, экранирующая волны напряжений от взрывов основных зарядов [1].

В связи с тем что в настоящее время отсутствуют общепризнанные методики расчета воздействия на массив контурных зарядов, а экспериментально довольно трудно это воздействие оценить в ближней зоне, было выполнено численное моделирование в программном продукте Ansys Autodyn, реализующем метод конечных элементов (МКЭ) для расчета высоко нелинейной динамики твердых тел, жидкостей и газов, а также их взаимодействия [2].

Постановка задачи

В первой части исследования рассмотрен взрыв контурного ряда скважин. Было рассмотрено два варианта взрыва контурной щели – для сухих и обводненных скважин. В качестве контурных зарядов использовались линейные заряды сплошной колонковой конструкции ЗКВ-Б диаметром 43 мм, которые помещались в скважины диаметром

140 мм. Расстояние между скважинами 1,5 м. Угол наклона скважин принят равным 75° . При таком угле контурный заряд прилегает к стенке скважины, что и было заложено в модель. Численные значения параметров радиальных и тангенциальных напряжений, а также скоростей смещения частиц массива снимались в точках, расположенных на расстоянии 1 и 5 м от скважин в сторону массива.

В качестве ВВ выбраны заряды ЗКВ-Б ($\rho = 1630 \text{ кг/м}^3$; $D = 6930 \text{ м/с}$; $Q = 6000 \text{ МДж/м}^3$; $P = 21 \text{ ГПа}$). Физико-механические и прочностные параметры горной породы соответствуют осредненным параметрам апатит-магнетитовых руд Ковдорского месторождения ($\rho = 2980 \text{ кг/м}^3$; $V_p = 4770 \text{ м/с}$; $\sigma_{сж} = 160 \text{ МПа}$; $\sigma_p = 16 \text{ МПа}$; $G = 27 \text{ ГПа}$). Более подробное описание модели приведено в работе [3].

Массив породы моделируется путем привязки геометрии к лагранжевому решателю, а взрывчатое вещество, продукты детонации и окружающая среда – посредством многокомпонентного эйлерового решателя. Данный подход к решению задач взрыва является одним из основных в программных продуктах данного класса, и широко освещен в работах зарубежных исследователей [4–10].

Полученные результаты

Результаты моделирования приведены на рис. 1 – 5.

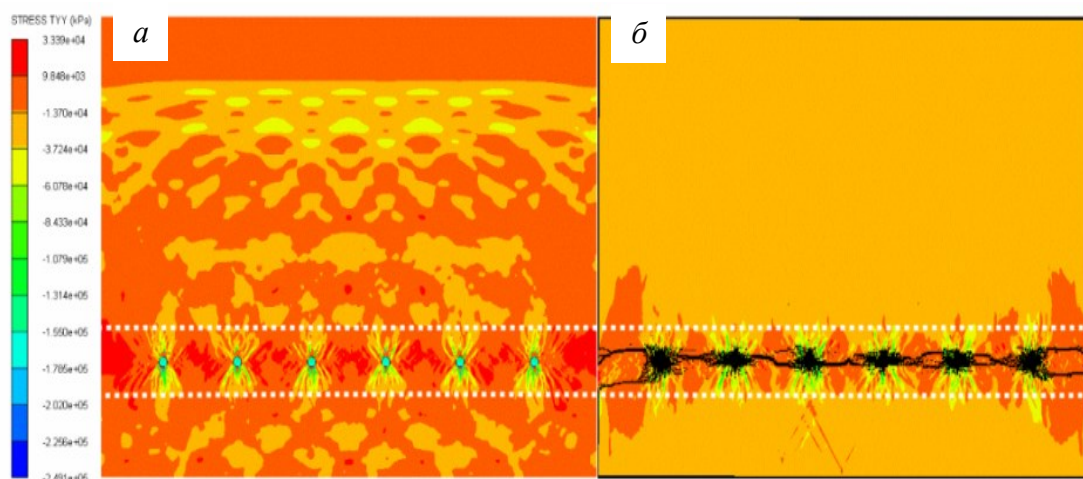


Рис. 1 – Распределение поля напряжений и формирование отрезной щели:
a – на момент времени 1 мс после взрыва; *б* – на момент времени 30 мс после взрыва контурных зарядов с воздушным промежутком

Из анализа распределения напряжений следует, что после инициирования зарядов между скважинами формируется поле растягивающих напряжений, уровень которых превышает предел прочности пород на растяжение, что в конечном итоге приводит к развитию трещин по линии расположения зарядов и образованию отрезной щели.

Графики радиальных (σ_3) и тангенциальных (σ_1) напряжений на расстоянии 1,0 и 5,0 м от линии зарядов представлены на рис. 2.

Из рис. 2 следует, что радиальные и тангенциальные сжимающие напряжения на расстоянии 5 м от щели в сторону массива имеют пиковое значение 43 и 10 МПа, соответственно, а растягивающие по тангенциальной компоненте 9 МПа, что значительно меньше прочностных характеристик массива горных пород. На расстоянии 1 м от щели сжимающие напряжения имеют пиковое значение 92 и 60 МПа, а растягивающие по тангенциальной компоненте 16 МПа, что превышает предел прочности горных пород на отрыв.

При взрыве контурных зарядов с водяным промежутком характер развития трещин несколько отличается от взрыва с воздушным промежутком (рис. 3). В данном случае на более ранней стадии начинают формироваться трещины между скважинами и уве-

личивается зона нарушений вблизи взрываемой щели, что связано с увеличением практически в два раза напряжений вследствие явления гидроудара (рис. 4).

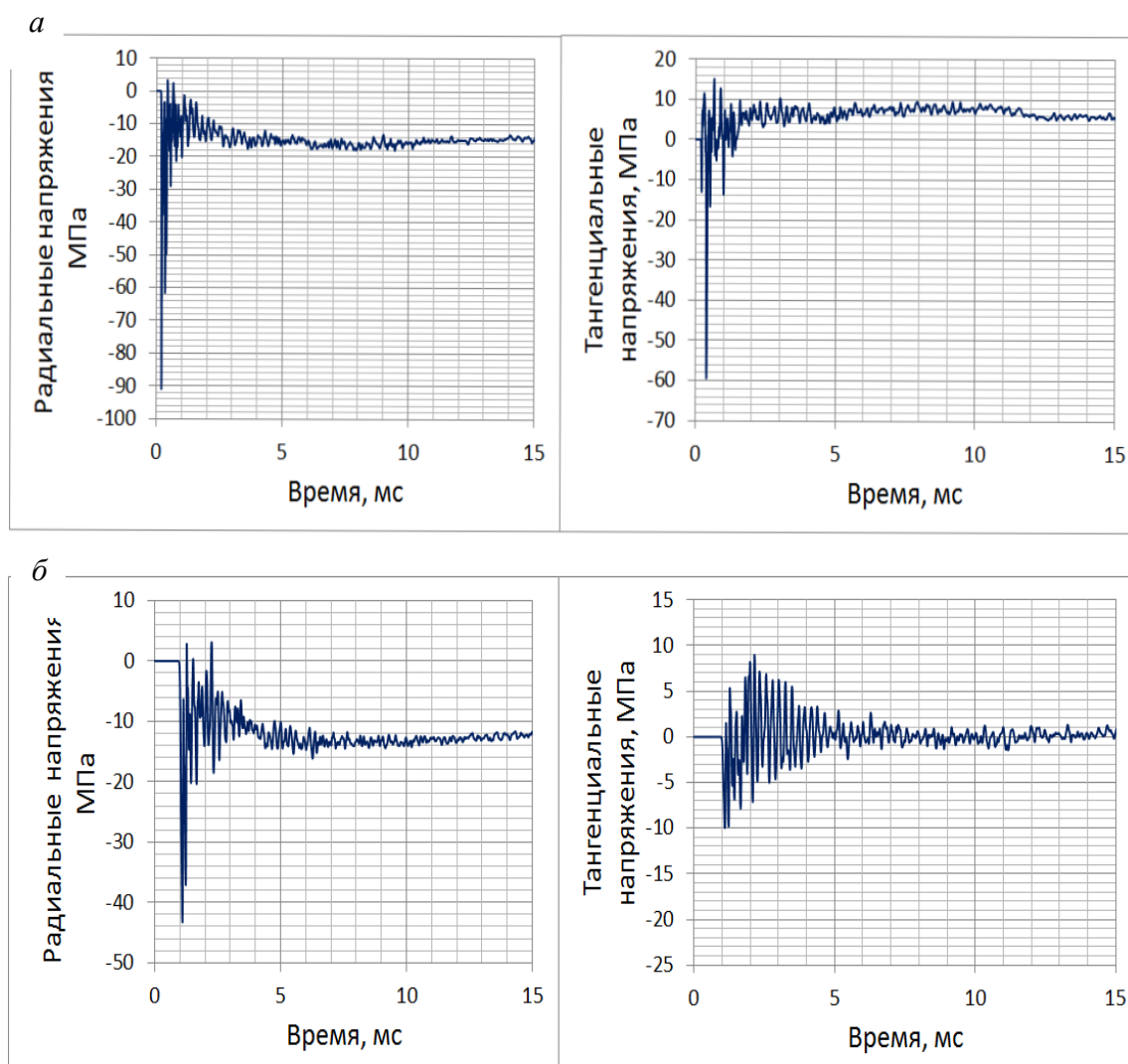


Рис. 2 – Радиальные и тангенциальные напряжения на расстоянии 1,0 м от линии зарядов (*а*) и на расстоянии 5,0 м (*б*) после взрыва контурных зарядов с воздушным промежутком

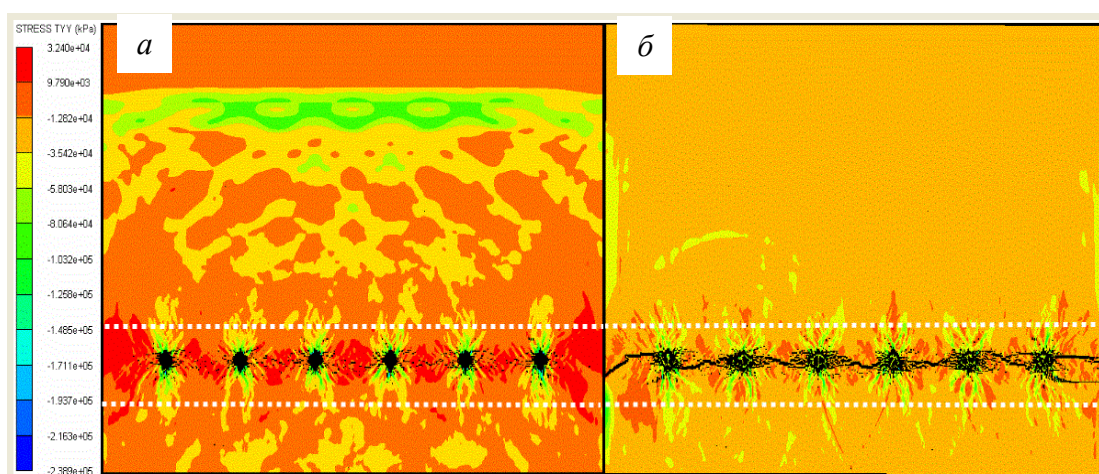


Рис. 3 – Распределение поля напряжений и формирование отрезной щели:
а – на момент времени 1 мс после взрыва;
б – на момент времени 30 мс после взрыва контурных зарядов с водяным промежутком

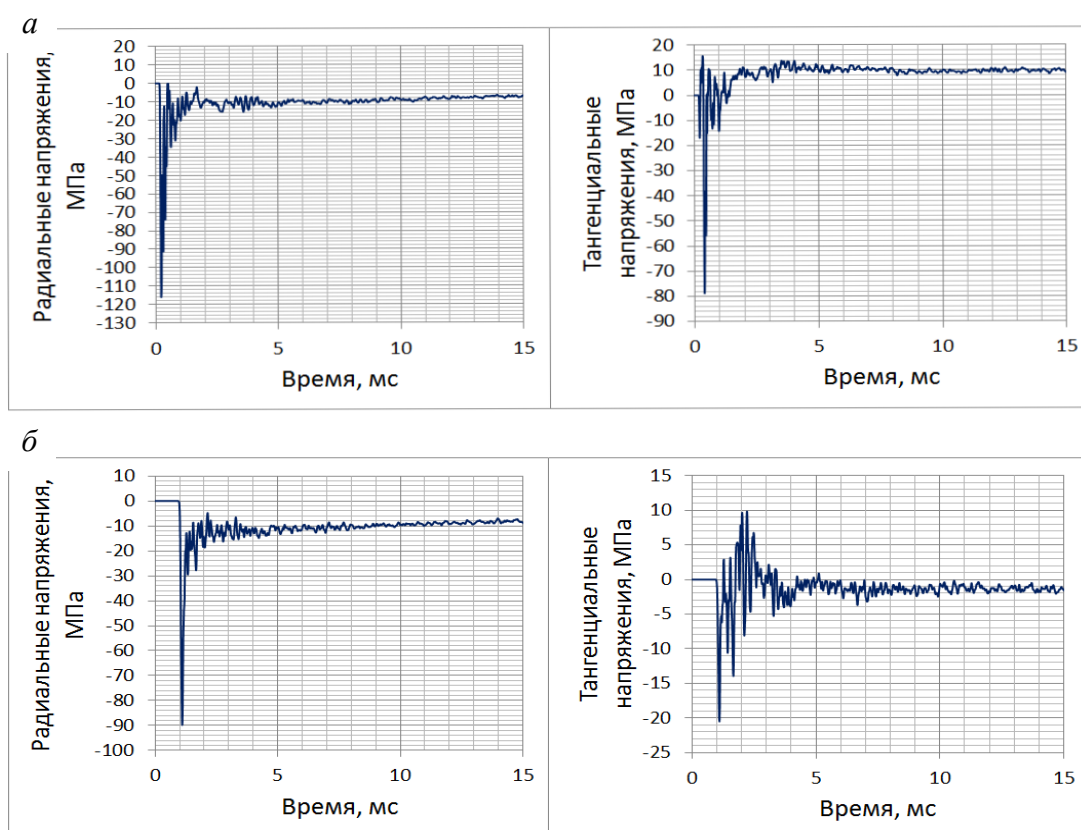


Рис. 4 – Радиальные и тангенциальные напряжения на расстоянии 1,0 м (а) и 5,0 м (б) от линии зарядов после взрыва контурных зарядов с водяным промежутком

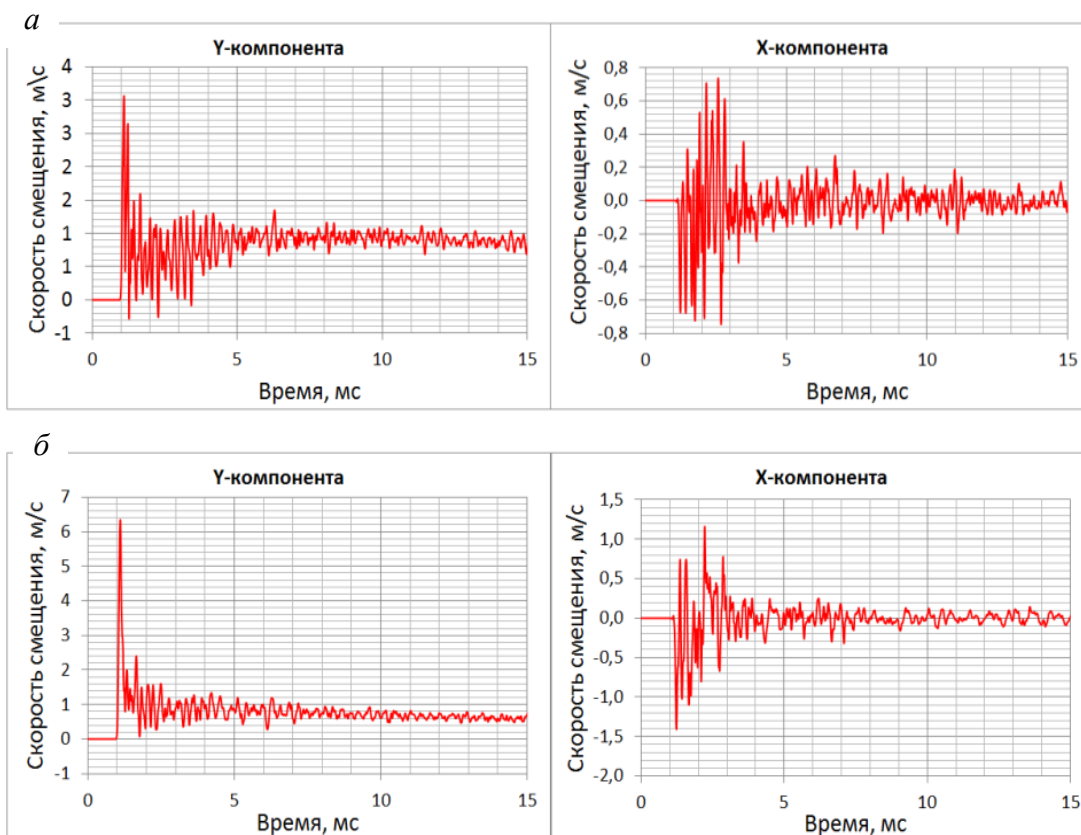


Рис. 5 – Скорости смещения точек массива по компонентам X и Y:
а – при взрыве зарядов с воздушным радиальным зазором;
б – при взрыве зарядов с радиальным зазором, заполненным водой

Из распределений скоростей смещения точек массива (рис. 5) следует, что происходит двукратное увеличение амплитуды по обоим компонентам. Так, при взрыве зарядов с воздушным радиальным зазором максимальное значение скоростей составляет 3,2 и 0,75 м/с по Y и X-компонентам, а при взрыве зарядов с радиальным зазором, заполненным водой, – 6,4 и 1,4 м/с.

С целью определения экранирующего действия отрезной щели в вышеописанную модель взрывания был добавлен участок массива, содержащий две скважины приконтурного блока диаметром 165 мм, расположенные по сетке $3,9 \times 4,1$ м. В качестве зарядов блока выбрано ANFO. Интервал замедлений между скважинами – 17 мс. Опережение взрыва отрезной щели к скважинам приконтурного блока принято равным 10 мс.

Картина распределения первого главного напряжения и разрушения массива через 1 мс после инициирования ближней к отрезной щели скважины приведена на рис. 6.

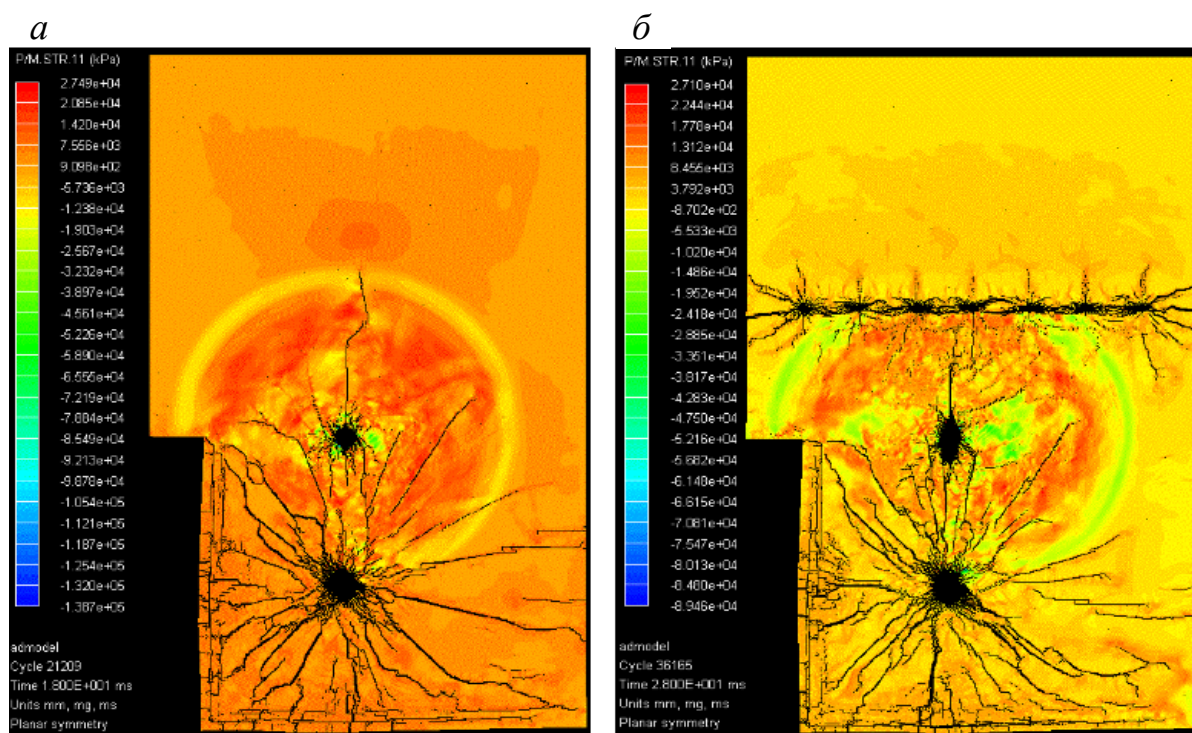


Рис. 6 – Распределение поля напряжений и разрушение массива через 1 мс после инициирования крайней скважины:
а – без учета отрезной щели; б – с учетом отрезной щели

Из анализа распределения напряжений и разрушений следует, что сформированная отрезная щель выступает в роли свободной поверхности, экранирующей волны напряжений и препятствующей росту трещин вглубь массива, о чем свидетельствует отражение волны напряжений от вновь образованной свободной поверхности и появление откольных трещин вдоль щели со стороны зарядов основного блока.

Графики напряжений на расстоянии 10 м от крайней скважины представлены на рис. 7.

Из графиков следует, что на расстоянии 10 м от приконтурного блока отчетливо прослеживаются два характерных скачка напряжений, вызванных взрывами скважин (см. рис. 7 а, б), при этом максимальное радиальное напряжение составляет 44 МПа, тангенциальное – 9 МПа. Анализ графиков напряжений с учетом сформированной отрезной щели показывает, что скачок напряжений приурочен непосредственно к взрыву самой щели в начальный момент времени (см. рис. 7 в, г), при этом волны напряжений, возникающие в результате взрыва зарядов приконтурного блока, практически полностью экранируются, что ведет к снижению сейсмозрывной нагрузки на законтурный массив.

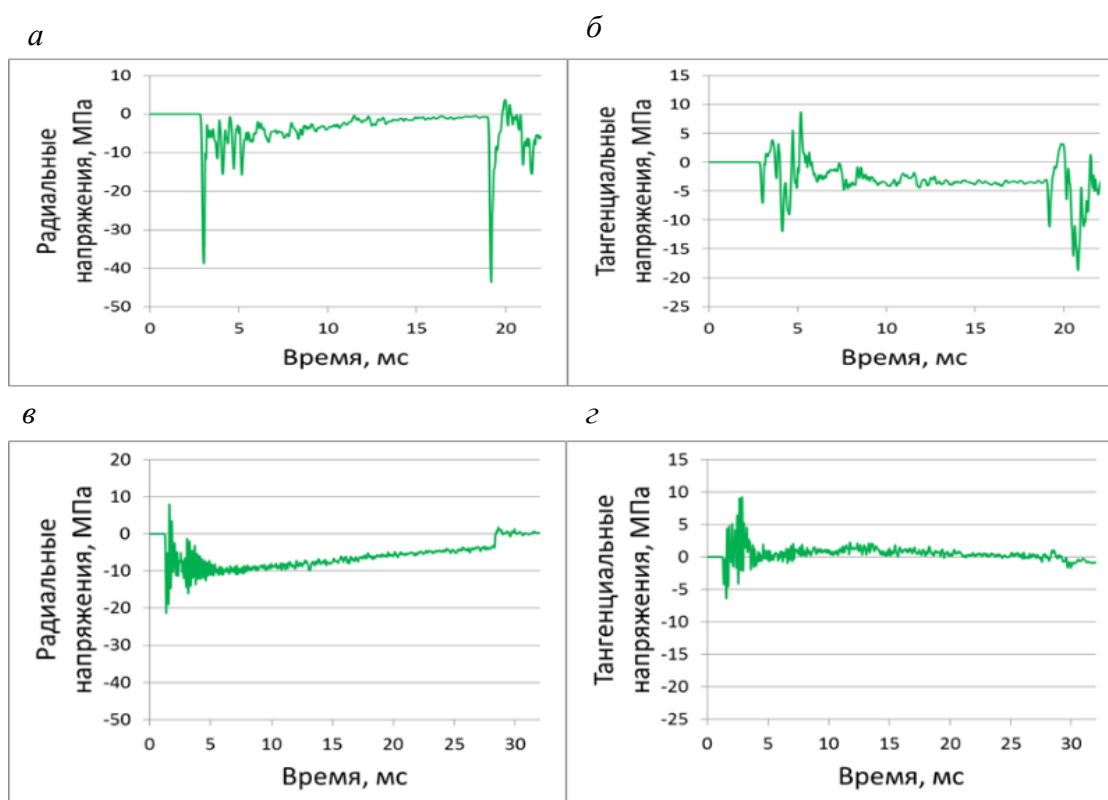


Рис. 7 – Радиальные и тангенциальные напряжения на расстоянии 10 м от скважин:
а, б – без учета отрезной щели; в, г – с учетом отрезной щели

Выводы

В результате проведенного вычислительного эксперимента установлено, что при взрыве контурного ряда наличие воды в скважинах приводит к значительному изменению НДС приконтурного массива в ближней зоне. Выявлено, что действующие сжимающие напряжения увеличиваются вдвое, а растягивающие – на величину до 10 % вследствие явления гидроудара. Показано, что при разделке отрезной щели возможно нарушение сплошности массива на расстоянии до 5 м от щели.

Литература

1. Фадеев А.Б. Дробящее и сейсмическое действие взрывов на карьерах / А.Б. Фадеев. – М.: Недра, 1972. – 136 с.
2. Ansys inc. Autodyn. Explicit software for non-linear dynamics: theory manual / Ansys inc., 2005. – 235 p.
3. Камянский В.Н. Оценка влияния сейсмозрывных нагрузок в ближней зоне взрыва / В.Н. Камянский // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – Спец. выпуск № 23. - С. 316 - 325.
4. Alia A. and Souli M. High explosive simulation using multi-material formulations // Applied Thermal Engineering. - 2006. - Vol. 26. - P. 1032 - 1042.
5. De A. et al. Numerical and physical modeling of geofam barriers as protection against effects of surface blast on underground tunnels // Geotextiles and Geomembranes. - 2016. - Vol. 44. - P. 1 - 12.
6. Deng X.F. et al. Numerical study on tunnel damage subject to blast-induced shock wave in jointed rock masses // Tunnelling and Underground Space Technology. - 2014. - Vol. 43. - P. 88 – 100.
7. Ugrcic M. Numerical simulation of the fragmentation process of high explosive projectiles // Scientific Technical Review. –2013.– Vol. 63, no. 2. – P. 47 - 57.



-
8. Wang et al. A full coupled numerical analysis approach for buried structures subjected to subsurface blast. - 2005. - Vol. 83. - P. 339 - 356.
 9. Yun S.H., Park T. Multi-physics blast analysis of reinforced high strength concrete // Journal of civil engineering. - 2013. - Vol. 17, no. 7. - P.777 - 788.
 10. Zhu Z. et al. Numerical investigation of blast-induced damage in cylindrical rocks // International journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. - 2008. - Vol. 4. - P. 111 - 121.