

## АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ ПРИ МАССОВЫХ ВЗРЫВАХ В КАРЬЕРАХ

А. И. Гончаров, В. И. Куликов

Институт динамики геосфер РАН, 119334 Москва, kulikov@idg4.chph.ras.ru

Приведены результаты экспериментальных исследований акустических волн амплитудой  $1 \div 100$  Па при массовых взрывах в карьерах. Получены форма волны, амплитуда, длительность, импульс и их зависимость от массы взрывчатого вещества на эпицентральных расстояниях  $1 \div 10$  км. Показано, что действие акустических волн на фасад многоэтажных зданий может возбуждать в несколько раз большие амплитуды колебаний, чем воздействие сейсмических волн.

Ключевые слова: акустическая волна, амплитуда волны, велосиграммы колебаний зданий.

## ВВЕДЕНИЕ

Акустические волны при взрывах химических взрывчатых веществ (ВВ) изучаются давно. М. А. Садовским [1] предложены эмпирические формулы для описания параметров ударных волн (УВ) при наземных взрывах в диапазоне  $1 < R/q^{1/3} < 10$  м/кг<sup>1/3</sup>. При взрыве зарядов тротила массой  $q > 100$  кг

$$\Delta p_{\max} = 0,95/(R/q^{1/3}) + 3,9/(R/q^{1/3})^2 + 13,0/(R/q^{1/3})^3, \quad (1)$$

$$t_+ = 1,35q^{1/3}(R/q^{1/3})^{1/2}, \quad I_+ = 0,0035q^{2/3}/R.$$

Здесь  $\Delta p_{\max}$  — приращение максимального давления, бар;  $R$  измеряется в метрах,  $q$  — в килограммах;  $t_+$  — длительность положительной фазы, мс;  $I_+$  — удельный импульс положительной фазы, бар·с. В конце исследованного диапазона приведенных расстояний  $R/q^{1/3}$  в формуле для давления (1) двумя последними членами можно пренебречь. Тогда давление УВ пропорционально  $1/R$ , что характерно для затухания сферических звуковых волн в акустическом приближении, когда скорость звуковых возмущений считается постоянной, а форма волны — неизменной [2]. При этом

$$p = Kq^{1/3}/R, \quad t_+ = Aq^{1/3}, \quad I_+ = Bq^{2/3}/R. \quad (2)$$

При распространении звука на большие расстояния становятся существенными нелинейные эффекты и параметры волн описываются асимптотическими формулами [2]:

$$p = K_1q^{1/3}/R(\ln Rq^{1/3})^{1/2}, \quad I_+ = B_1q^{2/3}/R,$$

$$t_+ = A_1q^{1/3}(\ln R/q^{1/3})^{1/2}. \quad (3)$$

Публикации, посвященные слабым воздушным (акустическим) волнам при камуфлетных взрывах и взрывах на выброс, немногочисленны [3, 4]. Ниже приведены результаты экспериментальных исследований параметров акустических волн и их воздействия на сооружения при массовых взрывах на карьерах Михайловского, Лебединского и Стойлинского горно-обогатительных комбинатов (ГОК).

Правила техники безопасности и технология проведения массовых взрывов не допускают генерации воздушных волн с амплитудой, опасной для остекления зданий и сооружений в районе карьера (опасными для остекления считаются амплитуды воздушных волн более 500 Па). Однако даже волны с амплитудами  $\approx 50$  Па могут представлять опасность, действуя на фасад многоэтажных сооружений и возбуждая в них колебания большей амплитуды, чем при воздействии сейсмических волн. При оценке безопасности проведения массовых взрывов указанное воздействие до сих пор не учитывалось, хотя с ростом этажности застройки и увеличением масштабов взрывов оно может стать опасным.

## ПОСТАНОВКА ВЗРЫВНЫХ РАБОТ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

При каждом массовом взрыве подрывалось несколько рудных блоков с интервалом около  $2 \div 5$  с. Блоки были пространственно рассредоточены по территории карьера, что позволяло при одном взрыве регистрировать несколько акустических волн от каждого блока. Блок

разбуривался сеткой скважин диаметром  $250 \div 480$  мм и длиной  $10 \div 20$  м с шагом  $\approx 6$  м. Одновременно подрывалась диагональ (группа) из  $4 \div 6$  скважин. Следующая группа подрывалась с задержкой  $30 \div 35$  мс (короткозамедленное взрывание). Количество групп в блоке — от 20 до 100. Масса ВВ (гранэмит) в скважине около 1,5 т, в группе — 10 т, в блоке — 300 т. Такая технология взрывного разрушения блока позволяет уменьшить сейсмическое воздействие массовых взрывов.

Регистрация акустических волн проводилась на расстояниях  $1 \div 10$  км от взрываемых блоков измерительным микрофоном фирмы Брюль и Кьер конденсаторного типа (модель 4147). Микрофон подключался к блоку формирования сигнала, состоящему из источника поляризационного напряжения и усилителя сигнала. С выхода этого блока сигнал подавался на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и далее записывался на персональный компьютер. Частотный диапазон микрофона  $0,004 \div 2000$  Гц. Чувствительность канала регистрации  $0,06 \div 0,3$  В/Па. Частота оцифровки сигнала 1 кГц. Число разрядов АЦП — 12.

Синхронно с регистрацией акустической волны от массовых взрывов на тот же компьютер велась запись сейсмических колебаний грунта и запись колебаний зданий с помощью сейсмометров СМЗ-КВ (в зданиях сейсмометры устанавливались на разных этажах). Сейсмические каналы работали в диапазоне частот  $0,5 \div 40$  Гц в режиме короткопериодных велосиметров.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Ниже приведены результаты анализа акустических волн, зарегистрированных при трех массовых взрывах на Стойлинском ГОК, пяти — на Михайловском ГОК и семи — на Лебединском ГОК, а также в модельных экспериментах. Типичная запись акустических волн и их спектра от массового взрыва 761 т ВВ на Михайловском ГОК 17.06.1999 показана на рис. 1. Было взорвано пять блоков, четыре из них — в первой ступени, пятый — с задержкой 2 с. Масса ВВ в блоках  $50 \div 350$  т. Блоки находились в различных местах карьера, расстояния от места регистрации до блоков составляли  $3,2 \div 4,65$  км. Благодаря различным эпицентральных расстояниям на регистрограмме можно выделить волны от взрыва каждого блока. Начальная часть регистрограммы усложне-

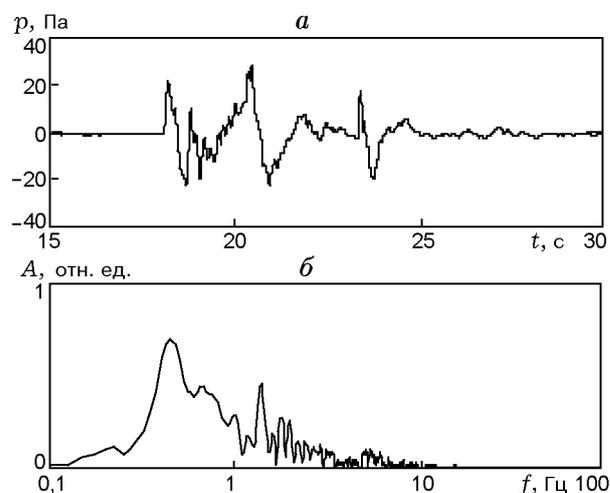


Рис. 1. Акустический сигнал и его спектр от массового взрыва на Михайловском ГОК 17 июня 1999 г. Эпицентральных расстояния  $3,2 \div 4,65$  км

на из-за суперпозиции волн от соседних блоков, а в конце выделяется изолированная волна от наиболее удаленного блока, взорванного с задержкой 2 с. Амплитуда волн не превышает 40 Па. Рассчитанный амплитудный спектр Фурье этой волны показывает, что ее основная энергия сосредоточена в диапазоне частот  $0,2 \div 5$  Гц. Такие волны не слышимы человеком.

В модельных экспериментах [3, 4] при взрывах сосредоточенных, удлиненных, а также системы удлиненных зарядов при различных глубинах заложения также наблюдалось четыре фазы. Они отчетливо выделяются на профиле последней акустической волны на рис. 1: первая положительная фаза — головная — образуется преломлением в воздух волны сжатия, выходящей на поверхность эпицентральной зоны; вторая положительная фаза образуется при выходе в воздух продуктов взрыва; третья фаза отражает процесс адиабатического остывания продуктов взрыва в полости, поэтому диапазон давлений отрицательный в отличие от первых двух, кроме того, длительность этой фазы во много раз больше длительности первых двух; четвертая положительная фаза отражает вторичное расширение продуктов взрыва в полости. Третья и четвертая фазы вызваны колебанием газового пузыря продуктов взрыва. Механизм и причины колебания такие же, как и при воздушном взрыве. После четвертой фазы иногда можно наблюдать дальнейшие колебания, но с небольшой

амплитудой. При короткозамедленном взрывании блоков с большим количеством групп первая и вторая фазы акустических волн не разделяются.

Амплитуда первой фазы обратно пропорциональна глубине заложения заряда, амплитуда второй фазы уменьшается с увеличением глубины заложения пропорционально глубине в степени 6,5. При мелкозаглубленных взрывах амплитуда второй фазы больше, чем первой, а при оптимальной глубине взрыва на выброс она одного порядка с первой; при камуфлетном взрыве — незначительна. Амплитуды третьей и четвертой фаз уменьшаются с ростом глубины заложения пропорционально глубине в степени 4, однако длительность этих фаз увеличивается с ростом глубины. При оптимальной глубине взрыва на выброс амплитуды этих фаз того же порядка, что и в первой фазе. При взрыве системы удлиненных зарядов наблюдается структурирование первой фазы акустической волны: появление зубцов и в определенных условиях распад на два и более импульсов.

В результате этих экспериментов установлено, что воздушные волны на расстояниях 1 ÷ 10 км даже при небольшом заглублении заряда являются акустическими, так как с расстоянием волны сохраняли свои фазовые характеристики, а их амплитуды уменьшались обратно пропорционально расстоянию. Скорость распространения волн совпадала со скоростью звука.

Одной из задач исследования акустических волн при массовых взрывах было установление приоритетной независимой переменной, определяющей амплитуду волны: масса ВВ в блоке либо масса ВВ в группе. Например, амплитуда сейсмических волн определялась массой ВВ в группе [5].

На рис. 2 представлены зависимости амплитуды давления в первой фазе акустических волн от массы ВВ в блоке, а также от взрыва отдельных скважин, специально взорванных в ходе этих исследований. Амплитуды давления пересчитаны к расстоянию 1 км. Отмечается большой разброс приведенных данных. Были проанализированы амплитуды волн для каждого ГОК отдельно, однако заметных отличий не установлено. По-видимому, это связано с тем, что параметры буровзрывных работ на ГОК отличаются незначительно (длина скважин, длина заряда, длина забойки). Поэтому полученный на различных ГОК экспери-

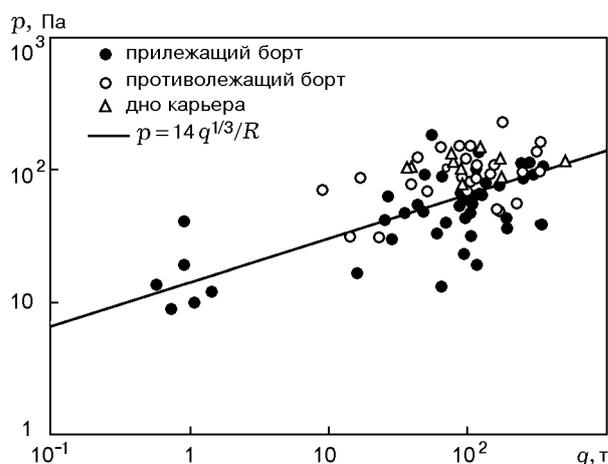


Рис. 2. Зависимость амплитуды акустической волны, приведенной к расстоянию 1 км, от массы заряда в блоке

ментальный материал рассмотрен совместно.

Экспериментальные точки, соответствующие взрывам отдельных скважин (масса ВВ  $q = 0,5 \div 1,5$  т) и взрывам блоков ( $q = 10 \div 500$  т), можно описать единой зависимостью вида (2):  $p = 14q^{1/3}/R$ , где  $q$  измеряется в тоннах,  $R$  — в километрах (сплошная линия на рис. 2). Среднеквадратичное отклонение экспериментальных значений от осредненной зависимости составляет 74 %.

Аналогичный анализ зависимости амплитуды акустической волны от массы ВВ в группе и скважине показал, что приоритетной независимой переменной, которая определяет амплитуду давления в первой фазе волны, является масса ВВ в блоке. По-видимому, применяемое на ГОК короткозамедленное взрывание с замедлением 20 ÷ 35 мс позволяет на эпицентральных расстояниях 1 ÷ 10 км сформироваться единой акустической волне от всего блока. Фактически это подтверждает и форма акустической волны (из рис. 1 видно, что волна лишена какой-либо тонкой структуры, обусловленной взрывом отдельных групп или отдельных скважин).

При анализе данных было замечено, что амплитуды акустических волн зависят от взаимного расположения блока в карьере и пункта регистрации. Амплитуда волны, пришедшей от блока на противоположном борту карьера, всегда больше амплитуды волны, пришедшей от блока на прилежащем борту. Эту закономерность иллюстрирует рис. 2. Качественно такое

влияние рельефа карьера на направленность излучения энергии или амплитуды акустической волны понятно. Для количественных оценок можно считать, что приведенная на рис. 2 осредненная зависимость  $p = 14q^{1/3}/R$  справедлива для блоков на дне карьера, для блоков на противоположном борту амплитуду следует удвоить, для блоков на прилежащем борту — уменьшить вдвое.

Импульсы давления первой фазы акустического сигнала, определенные численным интегрированием по времени, можно описать зависимостью  $I = (2/3)q^{2/3}/R$ . Полагая форму сигнала треугольной, получим выражение для длительности первой фазы:  $t_+ = 2I/p = 0,1q^{1/3}$  [с].

### ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ЗДАНИЙ ПРИ МАССОВЫХ ВЗРЫВАХ

Как видно из рис. 2, на расстоянии от блоков 1 км амплитуды акустических волн не превышают 50 Па и поэтому не представляют опасности для остекления, застройки и человека. Однако исследование колебаний зданий при массовых взрывах показало, что воздушные волны могут быть причиной интенсивных колебаний многоэтажных зданий.

На рис. 3 приведены запись давления в акустической волне и синхронно зарегистрированные велосигramмы горизонтальных колебаний 9-этажного жилого дома в г. Железнодорожском при массовом взрыве с  $q = 586$  т на Михайловском ГОК 19.05.2000. Взрывалось 7 блоков. Сначала подрывались четыре блока, затем с задержкой 2 с — пятый и шестой блоки и с задержкой 4 с — седьмой блок. Расстояния от блоков до здания  $3 \div 5,3$  км. На рис. 3,а,б показаны скорости горизонтальных колебаний 1-го и 9-го этажей здания, на рис. 3,в — регистрируемая акустическая волна микрофоном, установленным на крыше здания.

Колебания здания начинаются с приходом сейсмозврывной волны. Амплитуда колебаний длительностью около 6 с составляет  $\approx 1$  мм/с, их спектр достаточно широк. Спустя 8 с после прихода сейсмозврывной волны амплитуда колебаний здания возрастает на 1-м и 9-м этажах соответственно в 2 и 4 раза. Моменту возрастания амплитуды соответствует приход фронта первой акустической волны от ближайшего блока. Дальнейшее увеличение амплитуды колебаний приурочено к приходу последую-

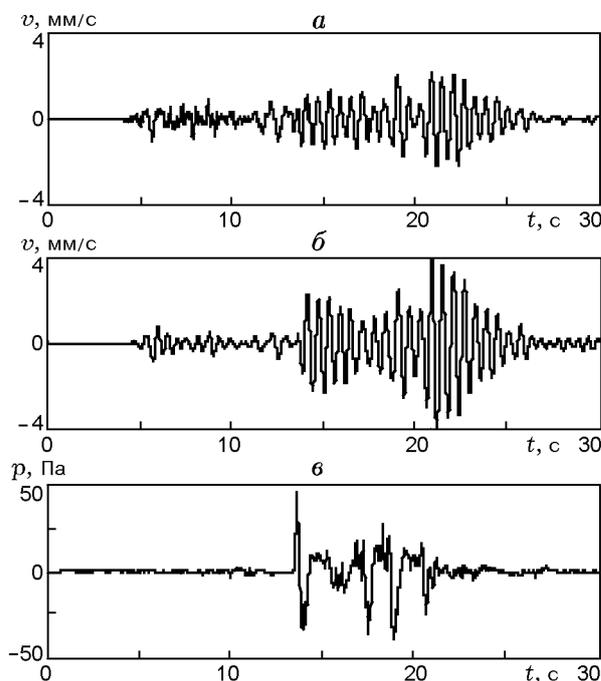


Рис. 3. Велосигramмы колебаний 1-го (а) и 9-го этажей (б) жилого дома и регистрируемая акустическая волна (в). Эпицентральные расстояния  $3 \div 5,3$  км

щих акустических волн от взрыва других блоков. Следовательно, достаточно слабые акустические волны амплитудой до 50 Па, действуя на фасад многоэтажного дома, могут его раскачать за счет парусности здания до амплитуд, больших, чем сейсмозврывная волна.

Отметим, что порог чувствительности человека к колебаниям составляет 1 мм/с, отсюда ясно, что жители этого дома ощущают колебания, вызванные не сейсмикой массового взрыва, а действием акустических волн. Причем возможные звуковые ощущения также вторичны и связаны с колебаниями строительных конструкций дома и предметов домашнего обихода.

Характер колебаний зданий при воздействии акустических волн иллюстрирует также рис. 4. На рис. 4,а совмещены велосигramмы колебаний 1-го и 9-го этажей, показанные на рис. 3, на рис. 4,б приведены рассчитанные амплитудные спектры Фурье этих велосигramм. Наблюдается синфазность колебаний верхнего и нижнего этажей здания при воздействии акустической волны, т. е. здание колеблется как целое или, точнее, раскачивается. Спектр вело-

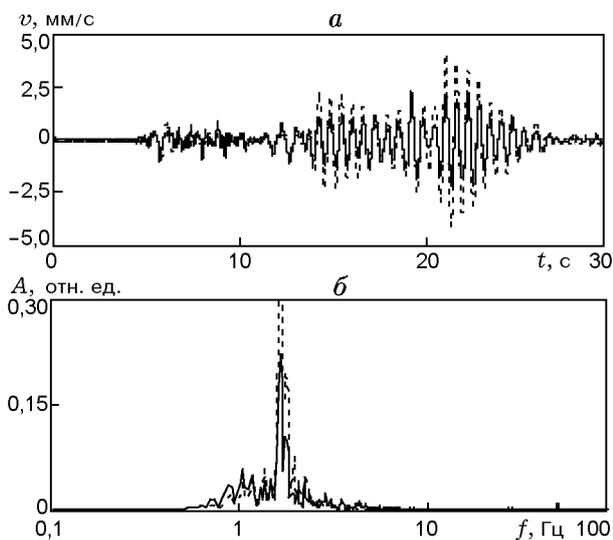


Рис. 4. Скорости горизонтальных колебаний (а) и их спектры (б) 1-го (сплошная) и 9-го (пунктир) этажей жилого дома. Эпицентральные расстояния  $3 \div 5,3$  км

сиграмм показывает, что качания практически монохроматические с частотой 1,7 Гц (спектр колебаний первого этажа здания от сейсмозрывной волны существенно более широкий и включает высокие частоты вплоть до 20 Гц). Частота 1,7 Гц наблюдается также при качании дома от ветрового воздействия и является частотой собственных колебаний здания.

Полученные данные показывают, что длительность первой фазы реального акустического сигнала меньше полупериода колебаний здания. Поэтому для оценки воздействия акустической волны на здание можно считать, что импульс силы (произведение импульса давления  $I_+$  на площадь здания по фасаду  $F$ ) воздействует на покоящуюся массу осциллятора и согласно закону сохранения момента импульса

$$J\dot{\varphi} = I_+Fl, \tag{4}$$

где  $J = M(l^2/3)$  — момент инерции здания,  $l$  — его высота,  $M$  — масса. Отсюда скорость колебаний здания определяется выражением

$$v = \frac{3I_+F}{M}, \tag{5}$$

поэтому для оценки достаточно знать примерное соотношение массы здания к его площади по фасаду. Для простоты будем считать, что в

плане этаж одного подъезда состоит из 18 помещений размером  $5 \times 3$  м. Толщину бетонных стен, перегородок и перекрытий будем считать одинаковой и равной 0,2 м. Плотность бетона  $2 \text{ т/м}^3$ . Высота этажа вместе с перекрытием 3 м. Тогда масса стен и перегородок составляет 210 т, масса межэтажного перекрытия — 110 т. Рассматриваемое здание состоит из 9 этажей и 10 межэтажных перекрытий, т. е. масса одного подъезда 3000 т. Ширина подъезда по фасаду 18 м, высота 27 м, площадь по фасаду  $F = 500 \text{ м}^2$ . Импульс давления первой фазы акустического сигнала, показанный на рис. 1, составляет 6 Па·с. Отсюда согласно (5) получаем  $v \approx 3 \text{ мм/с}$ . Грубый оценочный расчет дал значение, по порядку близкое к наблюдаемому.

Наблюдения были проведены на зданиях с 1, 3, 4, 9 и 14 этажами. Причем в 14-этажном здании колебания регистрировались не только на 1-м и 14-м этажах, но и на промежуточных уровнях. Наблюдения показали, что особенно сильно колебания зданий под действием акустических волн являются качания зданий с частотой собственных колебаний сооружения и с амплитудой, которая определяется амплитудой падающей акустической волны и парусностью здания. Для зданий высотой 3 этажа и менее воздействие акустической волны слабее воздействия сейсмозрывной волны и его можно не учитывать. Для 4-этажных зданий и выше действие акустических волн существенно. Для 9- и 14-этажных зданий воздействие акустической волны соответственно в 2 и 3 раза превышает воздействие сейсмики.

## ВЫВОДЫ

1. Получена волновая форма акустических волн на эпицентральных расстояниях  $1 \div 10$  км от массовых взрывов в карьерах.
2. Показано, что амплитуды акустических волн зависят от кубического корня из массы ВВ в блоке.
3. Акустические волны могут возбуждать колебания многоэтажных зданий, амплитуда которых в несколько раз больше, чем от воздействия сейсмозрывных волн.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Садовский М. А. Геофизика и физика взрыва / Под ред. В. В. Адушкина. М.: Наука, 1999.

2. **Ландау Л. Д. и Лифшиц Е. М.** Механика сплошных сред. М.: ГИТТЛ, 1954. С. 450–464.
3. **Гончаров А. И.** Воздушная волна при взрыве заглубленного заряда ВВ // Физические процессы в геосферах при сильных возмущениях (геофизика сильных возмущений). М.: ИДГ РАН, 1996. С. 284–286.
4. **Гончаров А. И.** Воздушные волны при взрыве заглубленного вертикального удлиненного заряда ВВ // Динамические процессы в геосферах под действием внешних и внутренних потоков энергии и вещества (геофизика сильных возмущений). М.: ИДГ РАН, 1998. С. 286–288.
5. **Цейтлин Я. И., Смолин Н. И.** Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов. М.: Недра, 1981.

*Поступила в редакцию 11/VI 2004 г.*

---