

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 534.222.2

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРОТИЛОВОГО ЭКВИВАЛЕНТА ВОЗДУШНЫХ ВЗРЫВОВ

© 2020 г. С. Н. Точилин¹, П. В. Комиссаров^{1,2*}, С. С. Басакина^{1,2}

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова
Российской академии наук, Москва, Россия

²Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: komissarov@center.chph.ras.ru

Поступила в редакцию 03.02.2020;

после доработки 03.02.2020;

принята в печать 20.03.2020

В статье проведены оценки влияния основных значимых внешних факторов на определение тротилового эквивалента воздушного взрыва. В частности, рассмотрено влияние приборных погрешностей измерения расстояния до эпицентра и давления на фронте воздушной ударной волны на величину тротилового эквивалента, рассчитанную по эмпирической формуле Садовского, связывающей избыточное давление на фронте ударной волны с расстоянием до эпицентра взрыва. Также рассмотрены погрешности определения тротилового эквивалента, возникающие из-за ветра в момент проведения взрыва. Показано, что даже незначительные ошибки в измерениях или условиях на экспериментальном поле могут существенно влиять на оценку итоговой величины тротилового эквивалента взрыва.

Ключевые слова: воздушные ударные волны, погрешности, тротилловый эквивалент, воздушный взрыв.

DOI: 10.31857/S0207401X20080130

ВВЕДЕНИЕ

При проведении наземных взрывов для сравнения и оценки мощности часто используется тротилловый эквивалент взрыва, определяемый путем сравнения измеренных параметров воздушной ударной волны (ВУВ) с аналитическими зависимостями этих параметров от расстояния до эпицентра взрыва [1]. Известно, что на результаты определения тротилового эквивалента взрыва заряда взрывчатого вещества (ВВ) могут оказывать влияние различные внешние факторы, такие как погрешности измерительной аппаратуры, а также атмосферные условия.

В ряде работ проводились экспериментальные исследования влияния метеорологических условий на параметры ВУВ. Например, в работе [2] были проведены экспериментальные исследования влияния различных параметров окружающей среды на амплитуду импульсов давления от мало-мощных наземных взрывов (с тротилловым эквивалентом взрыва до 1 кг) на расстояниях от 400 до 4200 м. Наблюдалось снижение амплитуды импульсов встречным ветром и лесным массивом. И наоборот, амплитуда увеличивалась при появлении температурной инверсии (роста температуры с высотой). Схожие результаты были получены в работе [3]. Было обнаружено увеличение воздей-

ствия ВУВ на преграду на дальних расстояниях при резком росте температуры окружающей среды. Подобное явление объяснялось инверсией скорости звуковых волн, когда по погодным условиям над поверхностью земли происходит локальное усиление скорости звука в определенных направлениях.

При ведении буровзрывных работ также учитываются атмосферные условия (температура и скорость ветра), от которых зависит скорость распространения звука в воздухе. В работе [4] отмечалось, что возрастание избыточного давления на фронте воздушных ударных волн может происходить в пасмурные дни при наличии низкой плотной облачности, сильном ветре, резко понижении температуры. При этом влияние влажности несущественно.

Влияние скорости ветра и температуры воздуха на степень воздействия воздушных ударных волн при взрывах скальных горных пород экспериментально исследовалось в работе [5]. При спаде температуры воздуха наблюдалось увеличение мощности взрыва и также было выявлено, что при скорости встречного ветра 7–9 м/с (от наблюдателя к эпицентру) мощность взрыва снижается в 1.5–6.2 раза в точке наблюдения по сравнению с условиями отсутствия ветра.

В работе [6] была получена зависимость избыточного давления на фронте ВУВ от свойств взрывае-мых горных пород и метеоусловий. Отмечается, что на малых расстояниях влияние метеоусловий сказывается незначительно, так как уменьшается воздействие аномальных и фокусирующих профилей градиентов скорости звука, приводящих к усилению ВУВ. Экспериментальные данные показали, что в условиях зимы избыточное давление на фронте ВУВ возрастает на дальних расстояниях (более 200 м), что подтверждает данные работы [5].

В работе [7] исследовалось влияние слоя нагретого воздуха на давление в ударной волне. Было установлено, что понижение давления в УВ после прохождения теплого слоя наблюдалось лишь при температуре, превышающей некоторое критическое значение; при меньшей же температуре давление возрастало по сравнению с давлением в волне при критической температуре.

Таким образом, анализ литературных данных показывает, что существенное влияние на определенные в работах [4, 6] величины тротилового эквивалента взрыва оказывают только приборные погрешности и погрешность, вызванная ветром в момент проведения взрыва. Очевидно, что такие погрешности не будут постоянными и будут накапливаться с увеличением расстояния до эпицентра взрыва. Также очевидно, что поскольку при определении тротилового эквивалента взрыва используется приведенное расстояние до заряда (расстояние, деленное на корень кубический из массы заряда), то погрешности будут также немонотонно зависеть от массы последнего. Обычно это обстоятельство в литературе игнорируется. Поэтому авторами представленной статьи проведена оценка влияния погрешностей измерения давления на фронте УВ, расстояний от эпицентра взрыва и скорости ветра на экспериментально определяемую величину тротилового эквивалента.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Определение тротилового эквивалента по результатам измерения параметров УВ основано на эмпирической зависимости, связывающей избыточное давление на фронте УВ с массой заряда и расстоянием от эпицентра взрыва (формула Садовского [1, 8]):

$$\Delta P_{\phi}(m, R) = 0.084(m^{1/3}/R) + 0.27(m^{1/3}/R)^2 + 0.7(m^{1/3}/R)^3, \quad (1)$$

где ΔP_{ϕ} – избыточное давление на фронте ВУВ, МПа; m – масса заряда, кг; R – расстояние от заряда, м. Величину $R/m^{1/3}$ называют приведенным расстоянием для массы m и обозначают через R' ($1 < R' < 10$).

Пусть погрешность датчиков давления составляет $\pm Q, \%$. Ошибка определения расстояния при использовании измерительной рулетки составляет ± 0.01 м.

Погрешность определения тротилового эквивалента, обусловленная погрешностью измерения давления, определяется по формуле

$$EP(R') = \frac{m - m_e}{m} = 1 - \left(\frac{R'}{R'_e}\right)^3, \quad (2)$$

где m – масса заряда, соответствующая давлению ΔP ; m_e – масса, соответствующая давлению $\Delta P \pm Q$; R'_e – приведенное расстояние для массы m_e ; R' и R'_e связаны между собой соотношениями.

$$0.084 \frac{1}{R'_e} + 0.27 \left(\frac{1}{R'_e}\right)^2 + 0.7 \left(\frac{1}{R'_e}\right)^3 = \frac{100 - Q}{100} \left[0.084 \frac{1}{R'} + 0.27 \left(\frac{1}{R'}\right)^2 + 0.7 \left(\frac{1}{R'}\right)^3 \right] \quad (3)$$

или

$$0.084 \frac{1}{R'_e} + 0.27 \left(\frac{1}{R'_e}\right)^2 + 0.7 \left(\frac{1}{R'_e}\right)^3 = \frac{100 + Q}{100} \left[0.084 \frac{1}{R'} + 0.27 \left(\frac{1}{R'}\right)^2 + 0.7 \left(\frac{1}{R'}\right)^3 \right]. \quad (4)$$

Погрешность определения тротилового эквивалента, обусловленная ошибкой измерения расстояний (± 0.01 м), определяется по формуле

$$ER(R') = 1 - \left[R' \left(R' \pm \frac{0.01}{m^{3/2}} \right)^{-1} \right]^3. \quad (5)$$

Общая погрешность определения тротилового эквивалента, обусловленная погрешностью измерения давления и ошибками измерения расстояний, определяется по формуле

$$ET(R') = \left[EP(R')^2 + ER(R')^2 \right]^{-1/2}. \quad (6)$$

Оценим далее влияние ветра на параметры УВ и погрешность определения тротилового эквивалента. Наиболее опасная с практической точки зрения ситуация занижения величины реального тротилового эквивалента взрыва возникает при встречном ветре относительно направления движения ВУВ. Параметры на фронте ВУВ при наличии ветра определяются, так же как и для ВУВ в невозмущенной среде, из уравнений сохранения массы, энергии, импульса и уравнения состояния газа:

$$\begin{aligned} \rho_1(D-w) &= \rho_2(D-u), \\ P_2 - P_1 &= \rho_1(u-w)(D-w), \\ E_1 - E_2 &= (V_1 - V_2)(P_1 + P_2)/2, \\ E &= P/\rho(\gamma-1), \end{aligned} \quad (7)$$

где P – давление, ρ – плотность, D – скорость УВ, u – массовая скорость за фронтом УВ, w – скорость движения среды (скорость ветра), V – удельный объем среды, E – удельная энергия среды, γ – коэффициент политропы (для воздуха $\gamma = 1.4$). Индексы “1” и “2” относятся к состоянию газа перед фронтом и на фронте УВ соответственно.

Скорость УВ, образовавшейся в результате взрыва заряда ВВ массой m , с использованием формулы Садовского можно выразить следующим образом:

$$D(m, R) = c \left[\frac{(\gamma+1)\Delta P_{\Phi}(m, R)}{2\gamma} + 1 \right]^{1/2}, \quad (8)$$

где c – скорость звука в невозмущенной среде.

Для УВ, распространяющейся в среде, которая движется со скоростью w , избыточное давление на фронте УВ можно определить по формуле

$$\begin{aligned} \Delta P_w(m, R, w) &= \\ &= \frac{P_1 \left[\left[(\gamma+1)\Delta_{\Phi} m, R / (2\lambda)_1 \right]^{1/2} + 1 + w/c \right]^2 \cdot 2\gamma}{\gamma+1}. \end{aligned} \quad (9)$$

Погрешность определения тротилового эквивалента при движении со скоростью w среды, по которой распространяется УВ, определяется по формуле

$$EW(R') = \frac{m - m_e}{m} = 1 - \left(\frac{R'}{R'_e} \right)^3, \quad (10)$$

где $R' = R/m^{1/3}$ и $R'_e = R/m_e^{1/3}$ связаны между собой соотношением

$$\begin{aligned} \Delta P_w(m_e, R_e, w) &= \Delta P_{\Phi}(m, R, 0) = \\ &= 0.084 \frac{1}{R'} + 0.27 \left(\frac{1}{R'} \right)^2 + 0.7 \left(\frac{1}{R'} \right)^3. \end{aligned} \quad (11)$$

Общая погрешность, обусловленная влиянием погрешностей измерительной аппаратуры, погрешностью измерения расстояний и влиянием ветра рассчитывается по формуле

$$ES = \left[EW(R')^2 + ET(R')^2 \right]^{1/2}. \quad (12)$$

Стоит также отметить, что используемая система уравнений описывает распространение УВ по среде, движущейся с постоянной скоростью вдоль луча, проведенного из эпицентра взрыва в сторону точки измерения параметров ВУВ. В случае бокового ветра в расчетах необходимо вместо величины w использовать проекцию ее вектора на

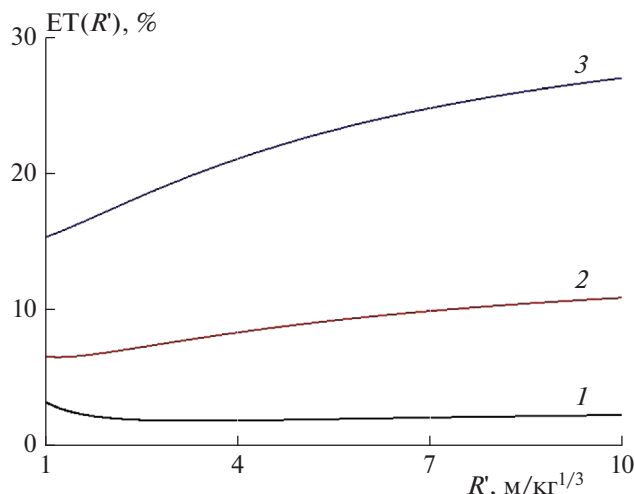


Рис. 1. Погрешность определения тротилового эквивалента для заряда массой 1 кг в зависимости от погрешности датчиков давления: 1 – 1%, 2 – 5%, 3 – 13%.

вышеуказанный луч: $w = \cos\alpha$, где α – угол между вектором скорости ветра и направлением установки датчика. Времена распространения ВУВ от взрывов зарядов ВВ массой в 1 кг и более составляют несколько миллисекунд, а характерные типичные времена порывов ветра составляют несколько секунд, поэтому можно считать, что УВ движется в стационарном потоке.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 1 представлены рассчитанные погрешности определения тротилового эквивалента для заряда массой 1 кг и трех значений погрешностей датчиков давления: 1%, 5% и 13%. Приборная погрешность датчиков выбрана типовой, соответствующей используемым авторами в эксперименте пьезокварцевым и пьезорезистивным датчикам давления с различной чувствительностью. Расчеты показывают, что накопленная ошибка растет немонотонно и для каждого типа датчиков имеется оптимальный диапазон измерений. Видно также, что погрешность определения тротилового эквивалента взрыва, согласно формуле Садовского, в области значений $R' = 1-10$ [1, 8] может составить до 26%, что существенно исказит реальную картину оценки мощности взрыва.

На рис. 2 представлены результаты расчета зависимости общей погрешности определения тротилового эквивалента при различных массах ВВ при погрешности измерительной аппаратуры 5%, включающей погрешность измерения расстояний и погрешность датчиков давления. Общая погрешность имеет минимум в области $R' = 1-2$ м/кг^{1/3} для зарядов массой 1 и 100 кг. Рост погрешности измерения вблизи заряда обусловлен погрешно-

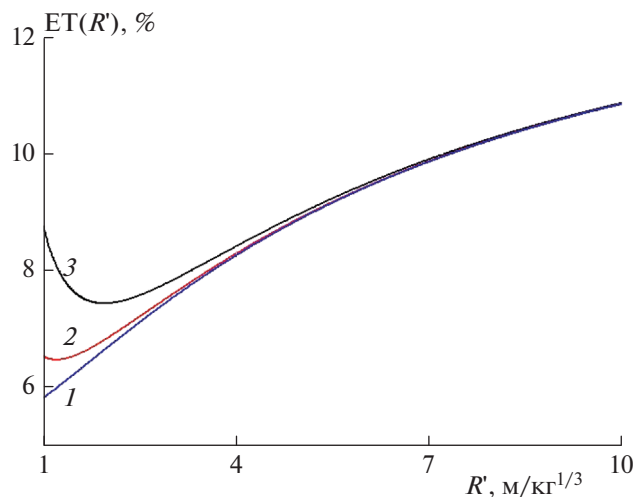


Рис. 2. Погрешность определения тротилового эквивалента при разных массах ВВ: 1 – 100 кг, 2 – 1 кг, 3 – 0.1 кг.

стью измерения расстояний, которая возрастает в случае зарядов меньшей массы за счет того, что те же самые приведенные расстояния будут соответствовать меньшим линейным расстояниям. А измерения рулеткой (обычно используемой в экспериментах) имеют большую относительную погрешность на небольших дистанциях. С дальнейшим увеличением расстояния от заряда погрешность измерения увеличивается. При увеличении массы заряда погрешность несущественно уменьшается в области $R' = 1-3$ м/кг^{1/3}.

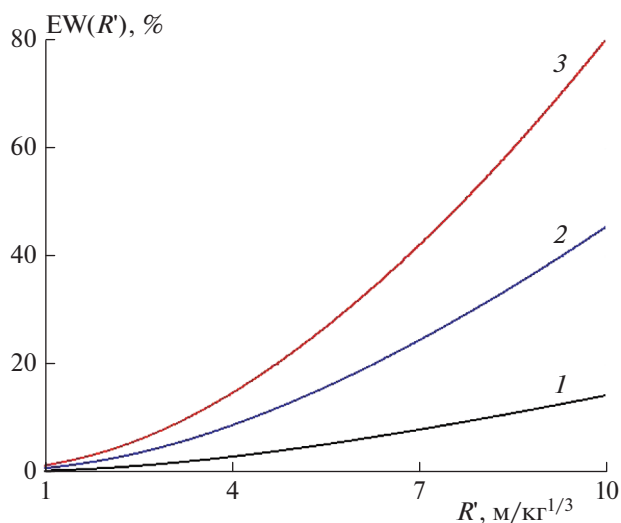


Рис. 3. График зависимости погрешности определения тротилового эквивалента для заряда массой 1 кг от приведенного расстояния при разных скоростях движения среды (ветер): 1 – 1 м/с, 2 – 3 м/с, 3 – 5 м/с.

На рис. 3 представлен график зависимости погрешности определения тротилового эквивалента от приведенного расстояния при скорости движения среды (ветер) 1, 3 и 5 м/с для заряда массой 1 кг. Видно, что пренебрежение измерениями скорости и учетом направления ветра может приводить к 80%-ной ошибке при определении тротилового эквивалента взрыва, причем в диапазоне скоростей ветра, постоянно наблюдающихся на открытых экспериментальных площадках, особенно в летнее время. Влияние ветра также показано на рис. 4, где представлен график зависимости общей погрешности определения тротилового эквивалента от приведенного расстояния при погрешности измерения давления 5%, скорости ветра в 3 м/с и без ветра, дующего навстречу направлению распространения ВУВ для заряда массой 1 кг. Видно, что в этом случае погрешность может достигать 46%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные оценки влияния на величину тротилового эквивалента взрыва погрешностей измерения давления, расстояния до заряда и ошибок, вносимых в результаты экспериментов при пренебрежении скоростью и направлением ветра во время проведения взрывных испытаний, показали, что:

– при выборе датчиков давления необходимо учитывать не только диапазон измерений датчика, но и его уровень погрешности, и использовать датчики в том диапазоне приведенных расстояний от заряда, на котором их погрешность мини-

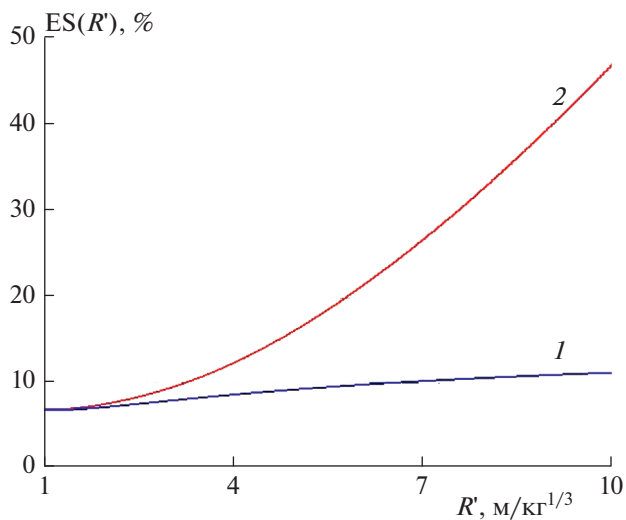


Рис. 4. График зависимости общей погрешности определения тротилового эквивалента для заряда массой 1 кг от приведенного расстояния при погрешности измерения давления 5%: 1 – без ветра, 2 – при скорости ветра 3 м/с.

мально искажает результат определения тротилового эквивалента взрыва;

– ошибки, возникающие в случае, когда при изменениях давления не учтены сила и направление ветра, могут кардинально изменять величину определяемого тротилового эквивалента взрыва. Рекомендуется также учитывать погрешность, вносимую при порывах ветра со скоростью более 1 м/с.

Взрывные испытания проведены с использованием оборудования УНУ “Сфера” Московского регионального взрывного ЦКП РАН в рамках программы фундаментальных исследований РАН.

Работа выполнена при поддержке Федеральным агентством научных организаций России в рамках проекта № 0082-2018-0002 (регистрационный код АААА-А18-118031490034-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Садовский М.А. // Физика взрыва. М.: Изд-во АН СССР. 1952. № 1.
2. Рыбнов Ю.С., Кудрявцев В.И., Евменов В.Ф. // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40. № 6. С. 98.
3. Корнилов М.В., Шеменев В.Г., Меньшиков П.В., Сидницын В.А. // Изв. вузов. Горн. журн. 2013. № 7. С. 65.
4. Барон В.Л., Кантор В.Х. // Техника и технология взрывных работ в США. М.: Недра, 1989.
5. Чан Куанг Хиеу, Белин В.А. // Горный информац.-аналит. бюл. 2013. С. 284.
6. Ганопольский М.И. // Там же. 2011. С. 5.
7. Охитин В.Н., Меньшаков С.С. // ПМТФ. 2002. Т. 43. № 4. С. 87.
8. Садовский М.А. Избранные труды: Геофизика и физика взрыва. М.: Наука, 2004.