В.Х.ПЕРГАМЕНТ
Магнитогорский технический университет,
Россия
Ю.Е.ОВЧАРОВ
ГУП «Специальные взрывные работы», Магнитогорск,
Россия
Е.В.ГОНЧАРОВ
Магнитогорский участок Челябинского округа Госгортехнадзора,
Россия

ИНТЕНСИВНОСТЬ ПО СЕЙСМИЧЕСКОЙ ШКАЛЕ, СКОРОСТЬ КОЛЕБАНИЙ И ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ПРИВЕДЕННЫЕ РАССТОЯНИЯ ПРИ ВЗРЫВАХ

Еще в начале 40-х гг. М.А.Садовским установлен факт корреляции степени повреждений зданий и сооружений при взрывах с величиной максимальной скорости колебаний грунта на дневной поверхности (в основании сооружений) [16, 17]. Величина этой скорости в случае мгновенных взрывов сосредоточенных (и эквивалентных им пространственно рассредоточенных и короткозамедленно взорванных) зарядов моделируется двупараметрическим аргументом – эквивалентным приведенным расстоянием, отображающим энергетический принцип подобия явлений при взрывах:

$$R_Э = r / \sqrt[3]{Q_Э},$$

где r – расстояние от центра взрыва; $Q_Э$ – энергия эквивалентного сосредоточенного мгновенно взорванного заряда (для аммонита и тротила взрыв 1 кг ВВ соответствует энерговыделению в 1000 ккал), кг ВВ.

В отличие от вызываемых землетрясением относительно низкочастотных, продолжительных (многоцикловых) колебаний, при которых коэффициент динамичности для большинства зданий и сооружений $\beta = 5$, в случаях взрывов период и длительность колебаний, а также обусловленный ими коэффициент динамичности на расстояниях, где наблюдаются повреждения объектов, оказываются значительно меньшими.

Как показано в более поздних работах [8, 18, 19], даже для крупных взрывов (вплоть до нескольких десятков и сотен килотонн ВВ) использование в качестве критерия сейсмической опасности скорости колебаний (а следовательно, и моделирующего ее приведенного расстояния) оказывается обычно предпочтительней, чем применение других параметров (например, ускорения колебаний грунта, смещения баллистического маятника СБМ [9, 20]), получаемых при инструментальных оценках интенсивности землетрясений. Эта предпочтительность обусловлена не только тем, что величина максимальной скорости колебаний грунта в основании сооружений хорошо коррелирует с повреждениями, получаемыми различными объектами, но и тем, что моделирующий эту скорость двупараметрический аргумент $R_Э$ энергетического подобия позволяет устанавливать четкую связь между массой ВВ (энергией эквивалентного мгновенного сосредоточенного взрыва) и расстоянием, почти не зависит от масштабных эффектов, проявляющихся при использовании других параметров (максимального смещения или ускорения) колебательных движений.

Установлено [1, 7, 9, 11, 20], что и при землетрясениях наблюдаемые макропроявления разной интенсивности также могут быть связаны с максимальной скоростью колебаний. Соответствующие одним и тем же макропроявлениям (разрушениям) разной интенсивности скорости колебаний при землетрясениях, как правило, не превышают значений, полученных измерениями при взрывах, а в ряде случаев (особенно при увеличенной интенсивности) скорости колебаний при разрушительных землетрясениях оказываются ниже, чем при взрывах, хотя нарушения в зданиях и сооружениях были аналогичными. Статистика повреждений зданий при взрывах представлена в работах [8, 10, 12].

Значения эквивалентных приведенных расстояний взрывов, соответствующие по проявлениям заданному баллу i Международной сейсмической шкалы колебаний (MSK-64 и ее последующих модификаций MSK-72, MSK-78 и MMSK-84 [7, 11, 20]), отображаются соотношением [12]

$$R_{Эi} = 1{,}9K_{гр}K_{зд}1{,}59^{10-i}, \qquad (1)$$

где $K_{гр}$ и $K_{зд}$ – коэффициенты, учитывающие соответственно типы грунтов в основании и состояние охраняемых зданий, для скальных пород, необводненных и обводненных наносов $K_{гр}$ равен 0,83; 1,0 и 1,82 соответственно, для зданий в удовлетворительном состоянии $K_{зд} = 1$ и при наличии небольших повреждений $K_{зд} = 1{,}2$.

В случае $K_{гр} = K_{зд} = 1$ из выражения (1) получается известное соотношение [10]

$$i = 5(2{,}3 - \lg R_Э) = 5\lg(200/R_Э). \qquad (2)$$

В нормативных документах [6, 21] для взрывных работ именно приведенное расстояние, определяющее скорости смещений, используется как параметр сейсмобезопасности. Для мгновенного взрыва сосредоточенного заряда этот параметр выражается произведением частных коэффициентов, учитывающих следующие факторы:

- типы грунтов в основании охраняемых объектов ($K_г = 5 \div 20$ м/кг$^{1/3}$);
- обводненность взрываемых пород ($K_о = 1 \div 2$);
- типы охраняемых наземных сооружений и зданий ($K_с = 1 \div 2$) и наличие повреждений в них ($K_п = 1 \div 2$);
- условия заглубления (показатель действия взрыва) зарядов ($\alpha = 0{,}5 \div 1$) [6].

Таким образом,

$$[R_Э] = K_г K_о K_с K_п \alpha.$$

Однако при определении коэффициента $K_г$ не учтено влияние типов взрываемых пород, а значения коэффициентов $K_с$ и $K_п$ рекомендованы для весьма ограниченного числа типов охра-

няемых наземных объектов и при отсутствии данных об их связи с уровнем допустимых скоростей смещений и баллами интенсивности, исключающими (или ограничивающими заданным уровнем) повреждения при взрывах (имеется лишь упоминание о 10-процентной вероятности незначительных повреждений отдельных охраняемых объектов).

В правилах [21] указаны нижние предельные значения эквивалентного приведенного расстояния для используемых (ГОСТ 6249-52) баллов i шкалы сейсмической интенсивности колебаний (MSK-64). Для i, равного 6; 7; 8; 9 и 10, $[R_Э]$ соответственно 25; 16; 7; 5 и 3 м/кг$^{1/3}$. При однократных и многократных взрывах (вблизи от каменных жилых зданий высотой до шести этажей, расположенных на почвенных, насыпных и водонасыщенных грунтах) для расчетов сейсмобезопасности приняты $[R_Э]$ равные 9 и 25 м/кг$^{1/3}$, что предполагает интенсивности сотрясений 7,5 и 5 баллов соответственно.

Эти оценки несколько выше, чем получающиеся для тех же баллов интенсивности согласно расчетам по формуле (2). Эти превышения обеспечивают дополнительный резерв сейсмобезопасности за счет того, что в работе [21] используются нижние предельные оценки уровней сотрясений, а в [10] – превышающие средний уровень (для той же интенсивности).

Хотя в рекомендациях [21] нет (как и в [6, 12]) указаний о связи оценки интенсивности сотрясений в баллах с величиной скорости колебаний при землетрясениях и (если предполагать различия) взрывах, а также оценки влияния на интенсивность типов взрываемых пород, следует признать целесообразной попытку (на основе оценок [10]) увязать используемый в нормативах безопасности параметр $R_Э$ моделирования сейсмоэффекта взрыва со шкалой сейсмической интенсивности, широко применяемой в практике строительства и проектирования.

В предложенной И.А.Ершовым и Н.В.Шебалиным [7] модификации (MMSK-84) двенадцатибалльной сейсмической шкалы интенсивности колебаний Медведева – Шпонхойера – Карника (MSK-64,MSK-72,MSK-78) для землетрясений каждый балл с 50-процентной вариацией в разных частотных диапазонах преобладающих колебаний характеризуется либо скоростями (v), либо ускорениями (a) смещений, связанными со шкалой интенсивности соотношением, отображающим известный психологический закон Вебера – Фехнера:

$$v \text{ (или } a) = 50(1\pm0{,}5)2^{i-6}. \qquad (3)$$

Баллы i интенсивности связаны со степенями d реакций на сейсмовоздействия разнотипных объектов, включающих: людей ($d_l = 0, \ldots, 6$), предметы ($d_p = 0, \ldots, 2$) и здания ($d_s = 0, \ldots, 5$). В каждом из указанных типов (l, p, s) объектов выделяются четыре класса со «своими» численными оценками ($K_{l(p,s)}$) «пороговых» баллов интенсивности, при которых многие (около 50 %) объекты данного класса еще проявляют нулевую степень реакции. Балл фактической интенсивности является при этом суммой «пороговой» численной оценки $K_{l(p,s)}$ данного класса (и типа) объектов и основной степени реакции ($d_{l(p,s)}$, испытываемой многими объектами этого типа и класса:

$$i = K_{l(p,s)} + d_{l(p,s)},$$

где $d_{l(p,s)}$ – основная, испытываемая многими (около 50 %) степень реакции объектов данного типа, $d_{l(p,s)} = 0$ – отсутствие реакции, $d_l = 1$ – слабое ощущение, $d_p = 1$ – слабая реакция, $d_s = 1$ – слабые повреждения, $d_l = 2$ – сильное ощущение, $d_p = 2$ – сильная реакция, $d_s = 2$ – умеренные повреждения, $d_l = 3$ – испуг, $d_l = 4$ – сильный испуг, $d_l = 5$ – паника, $d_l = 6$ – сильная паника, $d_s = 3$ – тяжелые повреждения, $d_s = 4$ – разрушения, $d_s = 5$ – обвалы; $K_{l(p,s)}$ – численная оценка пороговой (нулевой) интенсивности колебаний для данного типа и класса объектов, $K_l = 2{,}5$ – для людей чутких, $K_l = 3$ – нормальных, $K_l = 3{,}5$ – активных и $K_l = 5$ – для «шоферов-механизаторов»; $K_p = 4$ – для предметов неустойчивых, $K_p = 5$ – устойчивых, $K_p = 6$ – тяжелых и $K_p = 7$ – малоподвижных; $K_s = 4$ – для не имеющих усилений зданий из местных материалов плохого качества, $K_s = 4{,}5$ – удовлетворительного, $K_s = 5 \div 5{,}5$ – хорошего и $K_s = 6$ – очень хорошего качества; $K_s = 6$ – для зданий, имеющих сейсмические усиления 7-го балла, $K_s = 7$ – 8-го балла и $K_s = 8$ – 9-го балла.

Для трубопроводов (с учетом наблюдавшихся в магистралях и в местах стыков типичных нарушений при землетрясениях) по аналогии с [3] предлагается использовать следующие оценки K_m для газо- и водотрубопроводов при выявленных повреждениях:

• $K_m = 6{,}5$ – для проложенных на дневной поверхности трубопроводов небольшие смещения на опорах, а при неблагоприятных грунтах деформации и перекосы опор, поддерживающих трубопровод;

• $K_m = 7$ – плавные искривления в наземных металлических трубопроводах диаметром 100-150 мм, трещины в бетонных и в малоармированных железобетонных опорах наземных трубопроводов; смещения и падения опор и стоек неглубокого заложения, значительные деформации подземных (заглубленных) трубопроводов в местах подсоединения к массивным установкам; массовые нарушения нежестких стыков асбоцементных, бетонных и керамических трубопроводов;

• $K_m = 8$ – образование трещин в бетонных и железобетонных опорах, перекосы и проседания опор неглубокого заложения, сбросы наземных трубопроводов с опор; искривления в плане вдоль продольной оси заглубленных трубопроводов; значительные повреждения заглубленных стальных (в том числе и со сварными стыками) трубопроводов; разрушения асбоцементных, бетонных и железобетонных трубопроводов, массовые разрушения нежестких стыков в местах подсоединения к массивным сооружениям.

Доля W_z объектов, испытывающих приращенную степень реакции ($d_и = d_{осн} + z$), отличающуюся на z единиц от основной (т.е. от степени реакции $d_{осн}$, испытываемой многими объектами данного класса), в MMSK-84 выражается аппроксимированным нами соотношением для диапазона значений z от –1 до +1,5:

$$W = W_d \exp[-0{,}66z(2+z)] \approx 100\left(\sqrt[3]{e^2}\right)^{-(z+1)^2} \le 100\ \%, \qquad (4)$$

где $z = d_и - d_{осн}$ – численное отличие от основной (приращение) степени реакции, испытываемой долей W_z объектов данного класса, $z > 0$, если испытываемая степень реакции выше основной, $z < 0$ – если испытываемая степень реакции ниже основной; W_d – доля объектов данного класса, испытывающих основную степень реакции, $W_d = 50$ %.

Вычисленные по формуле (4) доли выборок объектов, проявляющих приращенные степени реакций (отличающиеся от основной на кратные 0,5 приращения от –1 до +1,5), следующие:

$z = d_и - d$	+1,5	+1,0	+0,5	0	–0,5	–1,0
W, % [20]	1,5	7	22	50–51	85	100
Число объектов – аналог количественных оценок по MMSK-84 [7]	Единичные (до 2 %)	Отдельные (до 10 %)	Некоторые (до 20 %)	Многие (около 50 %)	Большинство (75–80 %)	Все (более 98 %)

Очевидно соответствие полученных по соотношению (4) оценок количественным аналогам шкалы [7].

При сейсмических воздействиях на фоне основной степени реакции, испытываемой многими объектами, имеется статистическая вероятность того, что, по крайней мере, отдельные (13 %) из них (т.е. до 7 % от общего числа объектов данного типа и класса) могут испытать на «единицу» бóльшие степени реакций (соответствующие проявлению нарушений и повреждений, характерных для большего на единицу балла шкалы интенсивности), а меньшую на единицу степень реакции испытывают при этом практически все (более 98 %) объекты данного класса. Поэтому для одиночных объектов возможны двухбалльные различия крайних (минимальных и максимальных) оценок предполагаемых реакций.

Как показал выполненный в работах [3, 4, 10, 12, 14] анализ макропроявлений при взрывах со средним значением коэффициента грунтовых условий 6,7 м/с, типичным для взры-

вов рыхления скальных пород (балл $i = 3 \div 9$), интенсивность сотрясений по шкале MSK связана с величиной скорости смещений v_c грунта приближенным соотношением [14]

$$i = \mathrm{elg}(\pi v_c). \qquad (5)$$

В практически важном диапазоне $i = 5 \div 8$ баллов близкие к результатам (5) значения скоростей смещений (с различиями не более 22 %) получаются и из соотношения, рекомендованного Ф.Ф.Аптикаевым [1, 20],

$$v = 1{,}25 \cdot 10^{-3} i^6 = 10(i/4{,}5)^6, \qquad (6)$$

В отличие от соотношений (1)-(3), предполагающих постоянство «шагов» между предельными скоростями смещений и соответствующих им приведенных расстояний соседних баллов интенсивности, в (5) и (6) постоянство «шагов» не сохраняется. В области балла интенсивности $i = 6$ значения скоростей колебаний при взрывах и землетрясениях оказываются близки ($v = 50$ мм/с). Но для более высоких баллов предельные уровни скоростей колебаний при взрывах все более превосходят те, что характеризуют тот же балл интенсивности землетрясений. Для $i = 8$ скорость колебаний при взрывах, вычисленная по (5) и (6), в 1,4-1,5 раз превышает максимальную скорость при той же (по макропроявлениям) интенсивности землетрясений.

Для оперативного прогноза возможных нарушений и доли объектов, получивших их при заданных уровнях скорости колебаний от взрывов или землетрясений; оценки интенсивности сейсмических явлений, а также для определения эквивалентных приведенных расстояний мгновенных взрывов сосредоточенных (или эквивалентных им) зарядов по заданным баллам сотрясений грунта (или скоростям смещений) построена номограмма на выровненных параллельных шкалах.

Значения коэффициентов грунтовых условий ($K_v = 3 \div 21$ м/с) в обобщенной зависимости скорости смещений могут быть уточнены прямыми сейсмометрическими наблюдениями при взрывах для функции $v = f(R_Э)$ или оценены по упругим характеристикам пород в месте взрыва: скорости звука C_p; плотности γ; коэффициенту Пуассона σ или отношению C_s/C_p, – и отношению акустических жесткостей взрываемых пород и пород в основании охраняемого объекта $(\gamma C_p)/(\gamma C_p)_н$ [2, 12-15]:

$$K_v = \sqrt[3]{(C_p/9\gamma)[(1+\mu)/(1-\mu)]^2}\sqrt{(\gamma C_p)/(\gamma C_p)_н} = \sqrt[3]{(C_p/\gamma)[1-4/3(C_s/C_p)^2]^2}\sqrt{(\gamma C_p)/(\gamma C_p)_н}.$$

Тот факт, что при этом для взрываемых пород могут быть использованы не средние, а максимальные значения скорости звука и коэффициента Пуассона, может повлечь завышение (до 1,5 раз) расчетного значения K_v, что обеспечивает повышенный (не менее чем до 96 %) уровень надежности прогноза скорости смещений в пределах, не превышающих заданное расчетное (безопасное для объекта) значение, и дополнительно уменьшает вероятность попадания объекта в область положительных приращений степеней реакций.

Часто требуются уточненные значения допустимой скорости смещений объектов при взрывах с учетом состояния и типа несущих конструкций, материала стен, наличия усилений в различных наземных и подземных сооружениях; их важности (или ответственности) с последующим сопоставлением этих значений с баллами шкалы интенсивности. Методика учета особенностей объектов при определении допустимой скорости смещений от взрывов [2, 14] предполагает знание класса важности (ответственности) и суммарного (общего) ранга $P_{общ}$ наземного или заглубленного объекта:

$$v = 0{,}01\mathrm{e}\sqrt{\mathrm{e}^{K - P_{общ}}},$$

где $K = 1 \div 4$ – класс важности (ответственности) объекта: от особо ответственных (общегосударственного значения, архитектурные памятники и т.д., наземные и долговременно эксплуатируемые подземные выработки) с $K = 1$ до малоответственных объектов промышленного и гражданского строительства, складов, кратковременно (до 1 года) эксплуатируемых подземных горных выработок, повреждения которых не грозят здоровью людей и целости находящегося в

них оборудования ($K = 4$); $P_{общ}$ – суммарный ранг, определяемый суммированием частных рангов, учитывающих материал, тип, состояние и иные особенности охраняемых наземных или подземных объектов, для наземных сооружений $P_{общ} = P_с + P_м + P_т + P_у$, для подземных выработок $P_{общ} = P_{вм.п} - \Delta_{кр}$; $P_с$ – ранг состояния, равный 0; 1; 2; 3 соответственно для объектов, не имеющих нарушений при хорошем качестве строительных работ; имеющих небольшие трещины в стенах или заполнителе; имеющих значительные трещины в одном из несущих элементов; при значительных трещинах и в стенах и в каркасе; $P_м$ – ранг материала стен, равный 0; 1; 2; 3 соответственно для дерева; кирпича (камня, легких панелей); крупных панелей и блоков; $P_т$ – ранг типа несущих конструкций, равный 0 и 1, соответственно для зданий каркасного типа и зданий с несущими стенами; $P_у$ – ранг наличия специальных усилений, $P_у = 1$ – при отсутствии усилений; на каждый (свыше 6-го) балл усилений вычитается единица; $P_{вм.п}$ – ранг пород, вмещающих выработку, оцениваемый по скорости звука C_p в этих породах, $P_{вм.п} = 14{,}54 - \lg C_p$; $\Delta_{кр}$ – поправка на наличие и тип крепи, равная 0; 0,06; 0,25; 0,64; 0,72 и 1 соответственно при отсутствии крепи; набрызг-бетонной крепи толщиной 2-3 см; то же при толщине крепи 4-5 см либо при анкерной штанговой крепи с сеткой штанг 1×1 м^2; при сетке штанг $0{,}7 \times 0{,}7$ м^2; сплошной бетонной и сплошной металлической крепи.

Относительные изменения (по сравнению с мгновенными взрывами сосредоточенных зарядов) приведенных расстояний в зависимости от линейных размеров удлиненных и плоских зарядов, углов ориентации луча наблюдения на расстояниях, соизмеримых с этими размерами, а также от режимов короткозамедленного взрывания рассмотрены в публикациях [5, 12, 14] и частично отражены в нормативных документах [6, 21].

Представленные результаты и оценки могут быть полезны при обеспечении сейсмобезопасности взрывов. Для решения двух типов подобных задач определение безопасных расстояний и выбор допустимых зарядов взрывов при наземных и подземных охраняемых объектах реализованы в программной разработке АРБУС-В [16], используемой рядом производственных, горно-добывающих предприятий и проектных институтов при ведении и проектировании взрывных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Аптикаев Ф.Ф.* Сейсмические колебания при землетрясениях и взрывах. М.: Недра, 1978.

2. *Богацкий В.Ф.* Сейсмическая безопасность при взрывных работах / В.Ф.Богацкий, В.Х.Пергамент. М.: Недра, 1978.

3. *Гехман А.С.* Об оценке интенсивности землетрясений по степени повреждений трубопроводов // Вопросы инженерной сейсмологии. М.: Наука, 1985. Вып.26.

4. *Гехман А.С.* О сейсмостойкости трубопроводов // Вопросы инженерной сейсмологии. М.: Наука, 1989. Вып.30.

5. *Гитерман Е.Н.* Сравнительная оценка сейсмического действия короткозамедленных взрывов по данным прямых измерений и моделирования на ЭВМ / Е.Н.Гитерман, В.Х.Пергамент // Взрывное дело. 1983. Сб.85/42.

6. Единые правила безопасности при взрывных работах. М.: Недра, 1992.

7. *Ершов И.А.* Проблема конструкции шкалы интенсивности землетрясений с позиций сейсмологов / И.А.Ершов, Н.В.Шебалин // Вопросы инженерной сейсмологии. М.: Наука, 1984. Вып.25.

8. *Костюченко В.Н.* Статистики повреждения зданий при взрывных работах и вопросы сейсмической безопасности // ФТПРПИ. 1985. № 1.

9. *Медведев С.В.* Инженерная сейсмология. М.: Недра, 1962.

10. *Медведев С.В.* Сейсмика горных взрывов. М.: Недра, 1964.

11. *Медведев С.В.* Использование скоростей колебаний грунта для определения интенсивности землетрясений / С.В.Медведев, И.Л.Нерсесов, И.А.Ершов // Вопросы инженерной сейсмологии. М.: Наука, 1978. Вып.16.

12. *Пергамент В.Х.* Расчет сейсмобезопасных зарядов и расстояний при взрывных работах // Сейсмобезопасное взрывание на горных предприятиях: Сборник науч.трудов / МГМИ. Магнитогорск, 1975. Вып.151.

13. *Пергамент В.Х.* Учет пространственной рассредоточенности заряда ВВ в задачах взрывного дела // Инженерные методы управления действием взрыва: Сборник науч. трудов / МГМИ. Магнитогорск, 1971. Вып.89.

14. *Пергамент В.Х.* Автоматизированный расчет безопасных условий сейсмики взрывов (АРБУС-В) / В.Х.Пергамент, А.Б.Атлас, И.Т.Мельников, В.С.Сураев: Учеб. пособие / МГМИ. Магнитогорск, 1993.

15. *Пергамент В.Х.* Прогноз скоростей сейсмических колебаний при взрывах / В.Х.Пергамент, С.В.Медведев, В.Ф.Богацкий // Сейсмобезопасное взрывание на горных предприятиях: Сборник науч. трудов / МГМИ. Магнитогорск, 1975. Вып.151.

16. *Садовский М.А.* Сейсмический эффект взрывов. М.: Гостоптехиздат. 1939.

17. *Садовский М.А.* Оценка сейсмически опасных зон при взрывах // Труды Сейсмологического института АН СССР. 1947. Вып.106.

18. *Садовский М.А.* О сейсмическом действии подземных взрывов / М.А.Садовский, В.Н.Костюченко // Доклады АН СССР. 1974. Т.25. № 25.

19. *Садовский М.А.* Об основных положениях методики определения сейсмобезопасных расстояний при взрывах / М.А.Садовский, В.Н.Костюченко // Горный журнал. 1984. № 6.

20. Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности / Под ред. А.Т.Назарова и Н.В.Шебалина. М.: Наука, 1975.

21. Технические правила ведения взрывных работ на дневной поверхности. М.: Недра, 1972.