

стінок щілини забезпечуватиметься комплексним використанням явищ, якими супроводжується вибух системи свердловинних зарядів, а саме: перемішування закріплюючих розчинів з ґрунтом у прилеглих до свердловини шарах, що піддаються інтенсивному деформуванню [1], та розрідження у вибуховій порожнині після різкої зміни об'єму газів та їх температури.

Метод ефективний як при одночасному підриванні системи зарядів, так і при послідовному підриванні окремих невеликих зарядів. Це дозволяє захистити споруди на будівельному майданчику від сейсмічної дії вибуху.

1. *Кравець В. Г., Ваннічна В. В.* Технологічні параметри вибухового обвалення при створенні вибухом споруд типу „стіна в ґрунті” // Вісник НТУУ „КПІ”. – Серія „Гірництво”: Зб. наук. праць. – К.: НТУУ „КПІ”. – 2002. – Вип. 7. – С. 95–98.

2. *Пат. України № 62740, МПК E02D 5/20*; Опубл. 15.12.2003, Бюл. № 12.

3. *Пат. України № 62736 А, МПК E02D 5/20*; Опубл. 15.12.2003, Бюл. № 12.

4. *Кравець В. Г., Ваннічна В. В., Шайдецька Л. В.* Вплив довжини вертикального лінійного заряду на параметри воронки викиду // Вісник НТУУ „КПІ”. – Серія „Гірництво”: Зб. наук. праць. – Київ: НТУУ „КПІ”. – 2004. – Вип. 11. – С. 3–7.

УДК 622.235.535

О КРИТЕРИЯХ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВОВ

***В. В. Бойко, докт. техн. наук, А. А. Кузьменко, канд. техн. наук,
Т. В. Хлевнюк, инж. (Институт гидромеханики НАН Украины)***

Виконано оцінку впливу сейсмовибухових хвиль через ґрунтову основу на інженерні будівлі. Встановлено, що критеріями оцінки сейсмонезбезпеки вибуху для будівель, що охороняються, є амплітуда масової швидкості коливань та її частота. Отримано залежності, які дозволяють оцінити допустимі норми сейсмічних коливань для цегляних та глинобитних будівель, в тому числі ослаблених тріщинами.

Взрывные работы (ВР) являются одним из важнейших технологических процессов в горнодобывающей отрасли и при выполнении специальных работ (разрушение зданий, фундаментов, труб, борьба со стихией и т.п.). При этом необходимо обеспечить сейсмобезопасность прилегающей территории с инженерными сооружениями и проживающего населения.

Для прогнозирования интенсивности сейсмозврывных волн (СВВ) и снижения их вредного воздействия необходимо определить основные критерии сейсмоопасности и их величину для широкого круга охраняемых объектов. Эти

данные должны быть закреплены соответствующим нормативным документом (желательно государственным стандартом Украины).

Расчеты сейсмобезопасных расстояний, выполняемые на основе ЕПБ при ВР (1992 г.), СНиП-II-7-81 (1982 г.), литературных данных [1–7], приводят к ошибочным результатам, так как при этом не учитывается влияние частоты колебаний и технического состояния сооружения на его устойчивость.

Целью настоящей работы является выбор критериев оценки сейсмоопасности взрыва и определение параметров, которые отвечали бы типу и техническому состоянию охраняемого строения.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

на основании аналитических расчетов, определяющих сейсмическое действие взрывной волны на сооружение, выбирается критерий сейсмической опасности взрыва;

на основе анализа экспериментальных данных о параметрах сейсмо-взрывных волн и характеристиках зданий, в том числе ослабленных трещинами, проводятся исследования, и устанавливается допустимая динамическая нагрузка на сооружения в соответствии с его техническим состоянием и частотной характеристикой, а также с учетом амплитудно-частотной характеристики СВВ.

Когда грунт, на котором возведено строение, приходит в колебательное движение под действием сейсмических волн, он раскачивает сооружение как в целом, так и отдельные его части. Вместе с вынужденными колебаниями, соответствующими характеру возмущающих сейсмических сил, в сооружении возникают собственные колебания, зависящие от его формы, геометрических размеров и физических свойств строительного материала. Наложение этих движений вызывает в сооружении динамические усилия, которые могут стать угрожающими для прочности и целостности сооружения. Интенсивность динамических усилий в конструкциях сооружения зависит от мощности взрыва, расстояния от него, а также от характеристик сооружения (его упругих и демпфирующих свойств). Различают ближнюю зону, переходную и зону упругих деформаций грунтов.

Для обоснования критериев влияния сеймовзрывных волн на сооружения рассмотрим несколько частных случаев распространения волн в указанных ниже зонах.

Ближняя зона. В ближней зоне взрыва (в границах зоны не более $6 \text{ м/кг}^{1/3}$) смещение грунта имеет импульсный характер:

$$a(t) = ue^{-ft}, \quad (1)$$

где u – скорость смещения грунта, см/с; f – частота колебаний при нарастании начальной скорости смещения грунта до максимума ($1/f$ – время, в течение которого смещение грунта при взрыве достигает максимальной величины), Гц.

Дифференциальное уравнение движения сооружения (принимаем как идеально упругую систему с одной степенью свободы) определяется по формуле

$$m\ddot{x} + cx = -m\ddot{a}(t), \quad (2)$$

где m и c – масса и коэффициент жесткости системы; x – перемещение центра инерции системы.

Для рассматриваемого случая возмущения уравнение колебаний (2) имеет вид

$$\ddot{x} + f_0^2 x = 2uf(1 - f/2t)e^{-ft}, \quad (3)$$

где f_0 – частота собственных колебаний системы.

Общий интеграл уравнения (3)

$$X = B_1 \sin f_0 t + B_2 \cos f_0 t + \frac{2uf}{f^2 + f_0^2} \left[\frac{f_0^2}{f^2 - f_0^2} - \frac{f}{2t} \right] e^{-ft}.$$

Здесь первые два слагаемых соответствуют свободным колебаниям, остальные – вынужденному движению системы. Для определения постоянных интегрирования воспользуемся начальными условиями $t = 0, x = 0, \dot{x} = 0$.

Получим

$$B_1 = \frac{uf^2(3f_0^2 + f^2)}{f_0(f^2 + f_0^2)^2}, \quad B_2 = -\frac{2uf \cdot f_0^2}{(f^2 + f_0^2)^2}.$$

Следовательно,

$$x = \frac{uf^2(3f_0^2 + f^2)}{f_0(f^2 + f_0^2)^2} \sin f_0 t - \frac{2uf \cdot f_0^2}{(f^2 + f_0^2)^2} \cos f_0 t + \frac{2uf}{f^2 + f_0^2} \left[\frac{f_0^2}{f^2 + f_0^2} - \frac{f}{2t} \right] e^{-ft}. \quad (4)$$

Величины f_0 будут малы по сравнению с f , вследствие чего выражение (4) можно упростить и записать в виде

$$x = u \left[\frac{1}{f_0} \sin f_0 t - t e^{-ft} \right]. \quad (5)$$

Момент времени, соответствующий максимальному значению x , определится из уравнения

$$\cos f_0 t - (1 - ft)e^{-ft} = 0.$$

Если f значительно больше f_0 , то значение t , удовлетворяющее этому уравнению, мало отличается от $\pi/2f_0$. При этом значении t в выражении (5) $\sin f_0 t = 1$, а $t e^{-ft}$ мало отличается от нуля, поэтому

$$x_{\max} \approx \frac{u}{f_0}. \quad (6)$$

Таким образом, приходим к заключению, что при действии на упругую систему сейсмической волны типа импульса максимальные деформации системы пропорциональны начальной скорости изменения сейсмического импульса и обратно пропорциональны частоте собственных колебаний системы.

Следовательно, основной характеристикой сейсмической волны, влияющей на деформации и напряжения в системе, является скорость смещения грунта, а не ускорение или амплитуда.

Переходная зона. В переходной зоне (границы от 6 до 30 м/кг^{1/3}) перемещение грунта может быть представлено в виде затухающих колебаний типа

$$a(t) = A_0 e^{-kt} \sin \omega t, \quad (7)$$

где A – амплитуда колебаний; k – коэффициент затухания возмущения.

Дифференциальное уравнение колебаний сооружения

$$\ddot{x} + f_0^2 x = A_0 \left[(\omega^2 - k^2) \sin \omega t + 2k\omega \cos \omega t \right] e^{-kt}. \quad (8)$$

Введем обозначения:

$$\frac{k}{\omega} = \varepsilon, \quad \frac{f_0}{\omega} = \eta;$$

$$A = \frac{(f_0 - \varepsilon^2)(\eta^2 - 1 + \varepsilon^2) + 4\varepsilon^2}{(\eta^2 - 1 + \varepsilon^2) + 4\varepsilon^2} A_0;$$

$$\rho = \frac{2\varepsilon(\eta^2 - 2 - 2\varepsilon^2)}{(1 - \varepsilon^2)(\eta^2 - 1 + \varepsilon^2) + 4\varepsilon^2}.$$

Решение уравнения (8), удовлетворяющее начальным условиям $t=0, x=0, \dot{x}=0$, имеет вид

$$x = -A \left[\frac{\rho\omega - k}{f_0} \sin f_0 t + \cos f_0 t - (\rho \sin \omega t + \cos \omega t) e^{-kt} \right]. \quad (9)$$

Поскольку обычно частота колебаний сейсмозрывных волн больше частоты собственных колебаний сооружения, то η^2 мало по сравнению с единицей. Предположим также, что коэффициент k мал по сравнению с частотой ω , то есть $\varepsilon = 0$; в этом случае $A = A_0$, $\rho = 0$, следовательно,

$$x = -A_0 \left[\sqrt{16k^2 + 1} \sin(f_0 t + \varphi_0) - e^{-kt} \cos \omega t \right], \quad (10)$$

где $\operatorname{tg} \varphi_0 = 4f$.

Если величина коэффициента затухания волн k не очень мала по сравнению с частотой колебаний сооружения, то при действии на сооружения будут возникать преимущественно собственные колебания с амплитудой

$$A = \frac{4k}{f_0} A_0. \quad (11)$$

Величина силы, действующей на сооружение, отнесенная к единице его массы, будет равна

$$\frac{F}{M} = \frac{4k}{g} A_0 f_0 = \frac{4k\eta}{g} A_0 \omega = \frac{4k\eta u}{g}. \quad (12)$$

Выражение (12) показывает, что интенсивность колебаний сооружения и в переходной зоне прямо пропорциональна скорости смещения грунта.

Зона упругих деформаций грунтов. В зоне упругих деформаций грунтов, то есть на большом расстоянии от места взрыва (зона начинается с приведенных расстояний $30 \text{ м/кг}^{1/3}$) колебания грунта могут рассматриваться как установившиеся типа

$$a(t) = A \sin \omega t. \quad (13)$$

Дифференциальное уравнение колебаний системы с учетом затухания в ней имеет вид:

$$\ddot{x} + 2\lambda \dot{x} + f_0^2 x = A\omega^2 \sin \omega t.$$

Общий интеграл его для случая, когда затухание невелико,

$$x = \frac{A\omega^2}{\sqrt{(f_0^2 - \omega^2)^2 + 4\lambda^2 \omega^2}} \left[\frac{\omega}{f_0} e^{-\lambda t} \sin f_0 t - \sin \omega t \right]. \quad (14)$$

Здесь $f_0 = \sqrt{f_0^2 - \lambda^2}$ — частота собственных колебаний с учетом затухания. Поскольку предполагается, что $f_0 \gg \lambda$, то приближенно $f_0 = f_0$.

При действии на сооружение сейсмической волны, частота которой значительно больше частоты собственных колебаний сооружения, амплитуда вынужденных колебаний сооружения будет мала по сравнению с амплитудой его собственных колебаний, и выражение (14) может быть переписано в форме:

$$x = \frac{A\omega}{f_0} e^{-\lambda t} \sin f_0 t.$$

Это говорит о том, что смещения сооружения прямо пропорциональны скорости колебаний в сейсмической волне, так как $A\omega$ представляет собой скорость колебания грунта.

Если частота сейсмических волн мало отличается от частоты собственных колебаний сооружения, то есть $\frac{\omega}{a_0} \approx 1$, то решение (14) может быть представлено в виде

$$x = \frac{A\omega}{\lambda} (e^{-\lambda t} - 1) \sin f_0 t.$$

Отсюда видно, что в рассматриваемом случае (а это условие резонанса) амплитуда колебаний с увеличением времени действия взрывных волн возрастает и при достаточно большом значении t достигает наибольшей величины, равной $\frac{A\omega}{\lambda}$. При этом видно, что амплитуда колебаний сооружения в условиях резонанса зависит лишь от скорости колебаний в волне и коэффициента затухания сооружения.

Рассмотренные случаи возбуждения колебаний в системе с одной степенью свободы сейсмозрывными волнами позволяют сделать вывод, что деформации и динамические усилия, действующие на сооружение, прямо пропорциональны скорости колебаний сейсмической волны и обратно пропорциональны частоте собственных колебаний системы.

Таким образом, основными параметрами, определяющими сейсмическое действие взрывной волны на строение, являются амплитуда скорости смещения грунта и ее частота колебаний.

Учитывая прямую связь между скоростью смещения, частотой колебаний грунта и динамическими усилиями в конструкциях сооружения, а также малую зависимость скорости смещения от геологических условий ведения взрывных работ (кроме водонасыщенных грунтов), авторы рассматривают амплитуду скорости смещения грунта и частоту колебаний в качестве основных критериев оценки сейсмического действия взрыва. Эти характеристики сейсмической волны в данном качестве использовались авторами как нормативные параметры, которые необходимо было установить для различных типов строений с учетом их технического состояния.

Поставленные задачи решались путем проведения сейсмометрических наблюдений на территориях, застроенных промышленными сооружениями и жилыми зданиями, где интенсивность сейсмозрывных воздействий соответствовала 1–5 баллам по шкале MSK-64. После соответствующей обработки экспериментальных данных были получены зависимости между параметрами ВР, СВВ и интенсивностью воздействия на охраняемые объекты в виде графических и аналитических данных.

Для записи параметров сейсмозрывных волн применялась следующая аппаратура: сейсмоприемники СМ-3 и СМ-3В, три вида регистраторов – цифровой преобразователь с монтажной платой и с ПК типа ноутбук, магнитограф НО67 и светолучевой осциллограф НО44.3. При некоторых взрывах различные способы регистрации использовались параллельно.

Аппаратура прошла метрологическую аттестацию в "Укрметстандарт". Записи колебательного процесса для различных типов строений проводились как в самом здании, так и на его грунтовом основании. Определялись значения таких основных параметров волн, как амплитуда массовой скорости и период ее колебаний.

В Днепровском карьере ОАО «Полтавский ГОК», где отрабатывается месторождение железистых кварцитов, взрывные работы ведутся с использованием скважинных зарядов диаметром 250 мм, монтаж взрывной сети во время проведения исследований осуществлялся с помощью детонирующего шнура (ДШ). Зарегистрированы колебания от 7 массовых взрывов, в каждом из которых взрывалось от 10 до 14 блоков, расположенных на разных горизонтах.

Инженерно-геологическим обследованием грунтов у оснований зданий было определено, что эти здания, находящиеся на грунтах I и II категорий, имеют трещины как просадочного, так и сейсмического происхождения. Перед проведением замеров по каждому зданию в несущих его стенах замерялись длина и ширина всех трещин и определялся коэффициент ослабления K [9], а после каждого экспериментального взрыва контролировались изменения параметров трещин и фиксировались все вновь возникающие трещины. Накопленные данные в функции времени наблюдения позволили установить степень развития существующих и количество вновь возникающих трещин в зависимости от параметров сейсмозврывной волны (скорости и частоты колебаний), типа здания и гидрогеологической характеристики грунта у его основания.

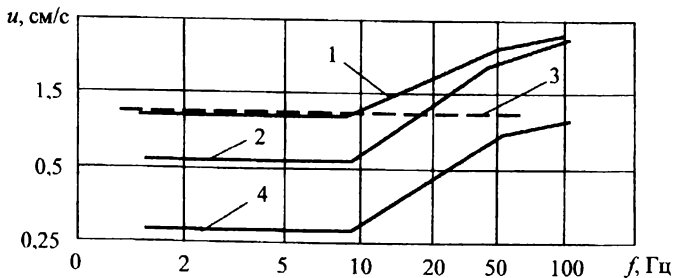
Результаты наблюдений за состоянием зданий и грунтовых оснований приведены в таблице.

Параметры состояния зданий и грунтовых оснований, подвергшихся влиянию сейсмозврывных волн

Масса заряда Q , кг	Расстояние от очага взрыва R , м	Приведенное расстояние $R/Q^{1/3}$, м/кг ^{1/3}	Место установки датчика	Коэффициент ослабления K	Смещение a , мм	Период колебаний, с	Скорость смещения u , см/с
3000	1660	115	Грунт I кат.		0,042	0,14	0,14
3000	1740	121	Здание	0,9	0,031	0,2	0,07
500	1350	60	Грунт II кат.		0,054	0,18	0,19
500	1420	63	Здание	0,9	0,025	0,28	0,06
500	1420	63	Здание	0,85	0,03	0,21	0,18
9000	3500	167	Грунт II кат.		0,057	0,15	0,18
9000	1350	167	Здание	0,8	0,042	0,32	0,1
5700	1420	41,7	Грунт I кат.		0,06	0,14	0,09
5700	1420	43,8	Здание	0,9	0,03	0,21	0,08

По результатам исследований в промышленных условиях получены графические зависимости для установления допустимой нормы сейсмических

колебаний для саманных, кирпичных зданий, в том числе ослабленных трещинами (рисунок).



Зависимости скорости колебаний оснований зданий от частоты: 1 — для кирпичных зданий без трещин; 2 — для саманных зданий, ослабленных трещинами; 3 — для кирпичных и железобетонных (без учета технического состояния) согласно СНиП-II-7-81; 4 — для кирпичных зданий, ослабленных трещинами

Результаты работы могут быть использованы для разработки государственного стандарта Украины по сейсмической безопасности промышленных взрывов.

1. Садовский М. А. Простейшие приемы определения сейсмической опасности массовых взрывов. — М.: Изд. АН СССР, 1946. — 29 с.
2. Сафонов Л. В., Кузнецов Г. В. Сейсмический эффект взрыва скважинных зарядов. — М.: Наука. — 1967. — 102 с.
3. Миронов П. С. Взрывы и сейсмобезопасность сооружений. — М.: Недра, 1973. — 168 с.
4. Цейтлин Я. И., Смолий Н. И. Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов. — М.: Недра, 1978 — 128 с.
5. Богацкий В. Ф., Пергамент В. Х. Сейсмическая безопасность при взрывных работах. — М.: Недра, 1978. — 128 с.
6. Мосинец В. Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах. — М.: Недра, 1976. — 271 с.
7. Безопасность взрывных работ в промышленности / Под ред. Б. Н. Кутузова. — М.: Недра, 1992. — 544 с.
8. Критерії оцінки небезпечності дії вибухових хвиль на будівлі, ослаблені тріщинами / В. В. Бойко, Т. В. Хлевнюк, К. Н. Ткачук, Л. О. Мітюк // Проблеми охорони праці в Україні — К.: ННДІОП, 2003. — Вип. 7. — С. 97–104.
9. Бойко В. В., Хлевнюк Т. В. Методика определения допустимого уровня сейсмоколебаний для жилых строений и промышленных сооружений // Труды 11 Всеукраинской науч.-практ. конф. «Охрана труда в Украине». — К., 1998. — С. 317–320.