

# ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ ГІРНИЧОГО ВИРОБНИЦТВА

УДК 622.235.535

## ОЦЕНКА СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ СООРУЖЕНИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НИХ ВЗРЫВНЫХ ВОЛН С УЧЕТОМ ИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

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

*Досліджено спільне коливання системи ґрунт–споруда, в тому числі вплив частотних характеристик будівель на їх сейсмостійкість при вибухових роботах. Обґрунтовано сейсдобезпечну дію вибухів на будинки і споруди.*

*Joint movement of system ground–construction including influence of frequency characteristics of buildings on their seismic stability at blasting operations is investigated. Seismic-safe blast effect on buildings and constructions is proved.*

Для расчета зданий и сооружений на сейсмостойкость и для прогнозирования сейсмического воздействия необходимо иметь достоверные данные о сейсмической нагрузке. При этом важно правильно оценивать изменение интенсивности сейсмических колебаний при их передаче от грунта к фундаменту сооружения и далее ко всем составляющим элементам сооружения с учетом их частотных характеристик.

В работах сейсмологов и специалистов взрывного дела [1–16] рассматриваются особенности перехода сейсмической волны из грунта в сооружение и отмечается, что интенсивность воздействия сейсмозрывных волн (СВВ) на сооружение, кроме основного критерия сейсмической опасности сооружения – скорости смещения грунта, зависит от отношения  $T/T_0$  ( $T$  – период колебания грунта, с;  $T_0$  – период собственных колебаний сооружения). Если это отношение мало, то амплитуда смещения конструкций сооружения по отношению к амплитуде смещения основания будет сравнительно небольшой. При значениях  $T$ , близких к  $T_0$ , амплитуда колебаний достигает максимума и может превысить амплитуду колебаний грунта в несколько раз (резонансное явление). Примерно такими качественными описаниями взаимодействия основания и конструкций сооружения заканчиваются исследования этого вопроса в указанных выше работах. Таблицы допустимых скоростей колебаний грунта в основаниях охраняемых объектов составляются без учета частотной характеристики колебательного процесса системы грунт–сооружение. Такой подход к определению безопасных параметров сейсмических колебаний ведет к увеличению интенсивности воздействия СВВ на охраняемые объекты и не гарантирует их безопасности.

Проведенные сотрудниками научно-исследовательской лаборатории по проблемам сейсмической безопасности технологических взрывов ИГМ НАН Украины теоретические и экспериментальные исследования сейсмического воздействия взрывов на здания и сооружения показали, что указанное воздей-

ствие определяется не только особенностями колебаний грунта, но в значительной мере конструктивными особенностями и динамическими свойствами сооружения, которые характеризуются периодом собственных колебаний  $T_0$  и логарифмическим декрементом затухания  $\lambda$ . Важным показателем в совместном колебательном процессе системы грунт–сооружение является амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), обозначенная в настоящей работе через  $B_{зд(m)}$ , которая указывает отношение амплитуды колебаний сооружения к амплитуде вынужденных колебаний в зависимости от отношения их периодов  $m = T_0 / T$ .

Для определения закономерностей распространения СВВ при переходе от амплитуд колебаний грунта ( $A_{гр}$ ) к амплитудам колебаний сооружений ( $A_{зд}$ ) воспользуемся известной зависимостью [15]

$$A_{зд} = A_{гр} \cdot B_{зд(m)}, \quad (1)$$

где  $B_{зд(m)} = \left[ \left( 1 - \frac{T^2}{T_0^2} \right)^2 + \frac{4\lambda^2}{\pi^2 + \lambda^2} \cdot \frac{T^2}{T_0^2} \right]^{-0,5}$ .

Литературные данные о величине периодов собственных колебаний зданий и сооружений и результаты их вычислений по известным формулам свидетельствуют о том, что для различных по конструктивным особенностям жилых зданий нормативные периоды собственных колебаний составляют в основном 0,2...0,4 с.

На данном этапе исследований нами выбраны здания с тремя значениями периода собственных колебаний: 0,2; 0,3 и 0,4 с.

Логарифмический декремент затухания колебаний указанных зданий в основном изменяется в пределах 0,25...0,35. В настоящих исследованиях принято значение  $\lambda = 0,3$ .

Период колебаний грунта  $T$ , вызванных действием СВВ, определяется следующим образом [16].

При взрывах скважинных зарядов в дальней упругой зоне в продольной волне

$$T_P = K_P \cdot Q_{л}^{1/6} (0,01l + 1), \text{ с}, \quad (2)$$

в поверхностной волне

$$T_R = K_R \cdot Q_{л}^{1/6} (0,015l + 1) \left( \frac{r}{Q^{1/3}} \right)^v, \text{ с}. \quad (3)$$

При взрывах сферических (сосредоточенных) зарядов в продольной волне

$$T_P = K_P \cdot Q^{1/6} \cdot H_0^{0,2}, \text{ с}, \quad (4)$$

в поверхностной волне

$$T_R = K_R \cdot Q^{1/6} \cdot H_0^{0,175} \left( \frac{r}{Q^{1/3}} \right)^v, \text{ с}. \quad (5)$$

В формулах (2–5)  $K_P$ ,  $K_R$ ,  $\nu$  – экспериментальные коэффициенты, значения которых приведены в табл. 1;  $Q_{\text{л}}$  – линейная масса скважинного заряда, кг/м;  $l$  – длина скважинного заряда, м;  $r$  – расстояние от места взрыва до пункта наблюдения, м;  $Q$  – масса одного заряда, кг;  $H_0$  – приведенная глубина заложения заряда, м/кг<sup>1/3</sup>.

Таблица 1. Значения экспериментальных коэффициентов

Грунт в месте взрыва	Скважинные заряды			Сферические заряды		
	$K_P$	$K_R$	$\nu$	$K_P$	$K_R$	$\nu$
Суглинки	0,065	0,095	0,1	0,055	0,065	0,1
Известняки	0,012	0,03	0,21	0,02	0,025	0,25
Граниты	0,01	0,012	0,38	0,01	0,008	0,4

Анализ частотных характеристик колебаний при технологических взрывах показывает, что периоды максимальных амплитуд СВВ в основном находятся в диапазоне 0,025...0,2 с.

Если значения скорости смещения грунта в основании сооружения сейсмической шкалы для взрывов пересчитать с использованием формулы (1), то есть с учетом частотных характеристик колеблющихся объектов, то результаты в резонансной области колебаний ( $T/T_0 = 0,5...1,0$ ) будут значительно отличаться от данных сейсмической шкалы, где не учитывается частотный фактор (табл. 2 и рис. 1).

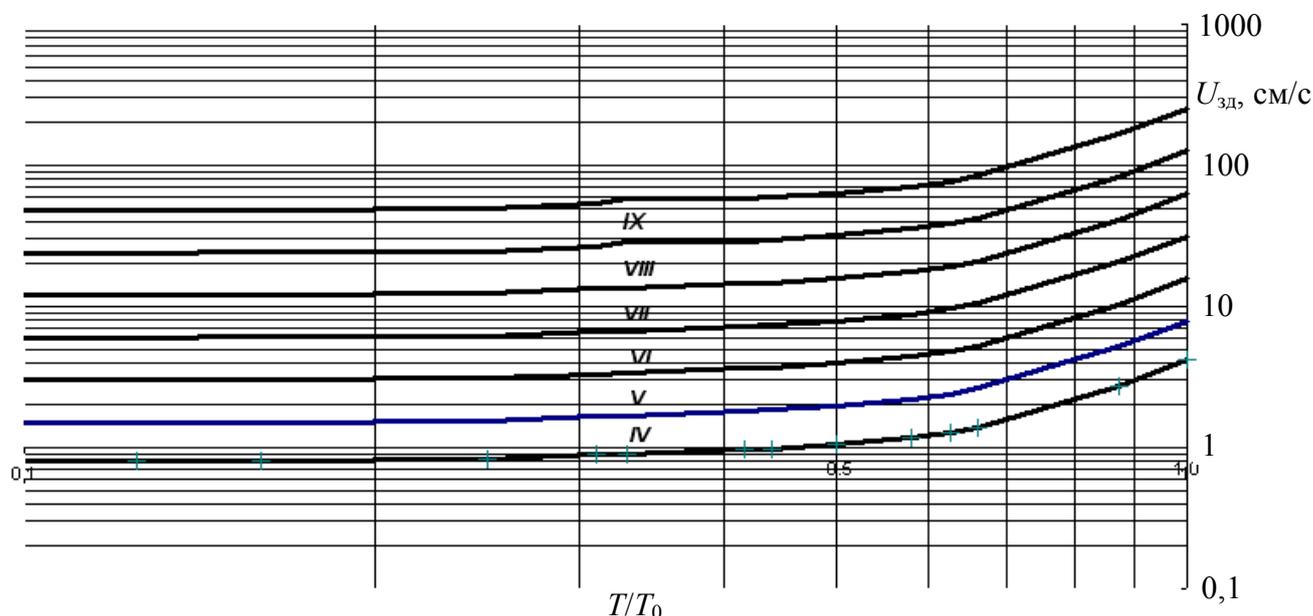


Рис. 1. Зависимость интенсивности воздействий СВВ на здание от величины отношения  $T/T_0$  при  $\lambda = 0,3$

Из представленных данных видно, что, например, при интенсивности воздействия 4 балла по сейсмической шкале для взрывов, в которой не учитывается частотный фактор, охраняемый объект испытывает нагрузки 0,8...1,5 см/с, а фактически эти нагрузки возрастают до 5...7 см/с (6 баллов)

Таблица 2. Шкала интенсивности сейсмических колебаний при взрывных работах с учетом частотных характеристик колебательной системы

<i>I</i> , бал- лы	<i>U</i> <sub>гр</sub> , см/с	<i>U</i> <sub>зд</sub> (см/с) при $\lambda = 0,3$ и отношении $T/T_0$														
		0,0625	0,08	0,125	0,16	0,25	0,31	0,33	0,416	0,44	0,5	0,58	0,625	0,66	0,875	1,0
4	0,8– 1,5	0,8– 1,5	0,8– 1,5	0,8– 1,5	0,81– 1,51	0,824 –1,54	0,89– 1,66	0,89– 1,68	0,97– 1,81	0,98– 1,84	1,05– 1,98	1,17– 2,2	1,29– 2,41	1,4– 2,62	2,75– 5,16	4,2– 7,87
5	1,5–3,0	3,0	3,0	3,0	3,03	3,09	333	336	363	3,69	3,96	4,41	4,83	5,25	10,32	15,75
6	3,0–6,0	6,0	6,0	6,0	6,06	6,18	6,66	6,72	7,26	7,38	7,92	8,82	9,66	10,5	20,64	31,5
7	6,0–12,0	12,0	12,0	12,0	12,12	12,36	13,32	13,44	14,52	14,76	15,84	17,64	19,32	21,0	41,28	63,0
8	12,0–24,0	24,0	24,0	24,0	24,24	24,72	26,64	28,88	29,04	29,52	31,68	35,28	38,64	42,0	82,56	126,0
9	24,0–48,0	48,0	48,0	48,0	48,48	49,44	53,28	57,76	58,08	59,04	63,36	70,56	77,28	84,0	165,1	252,0

при приближении отношения  $T/T_0$  к резонансной области, что может повлечь за собой повреждение сооружений. Поэтому учет АЧХ колебаний грунта и сооружения является необходимым условием безопасности охраняемых объектов при ведении взрывных работ.

Для оценки сейсмостойкости сооружения необходимо знать наибольшие значения действующих на него динамических воздействий. Последние можно оценить с помощью стандартного сейсмометра СБМ со следующими постоянными характеристиками: собственные колебания маятника ( $T_{СБМ} = 0,25$  с) и логарифмический декремент затухания колебания маятника ( $\lambda_{СБМ} = 0,5$ ), установленного на здании.

Колебания упругого маятника сейсмоприемника описываются линейным дифференциальным уравнением второго порядка [15]

$$\frac{\partial^2 A_{зд}}{\partial t^2} + \frac{2\lambda \partial A_{зд}}{T \partial t} + \frac{4\pi^2 \cdot A_{зд}}{T^2} = \frac{\partial^2 A_{гр}}{\partial t^2}. \quad (6)$$

Величина  $A_{зд}$ , представляющая собой амплитуду колебания маятника, основание которого движется по закону  $A_{гр} = A_{гр}(t)$ , пропорциональна деформации изгиба вертикальной оси здания. Максимальному значению  $A_{зд}$  будут соответствовать максимальные значения деформации. Для оценки сейсмостойкости здания важно знать наибольшие значения деформации. Поэтому при решении (6) можно ограничиться определением лишь максимальных значений  $A_{зд}$ , которые различны при разных значениях  $T$  и  $\lambda$ . Следовательно, максимальная амплитуда колебания маятника  $A_{зд}$  является функцией периода затухания при данном динамическом воздействии:

$$A_{зд.макс} = A_{зд} \cdot (T, \lambda). \quad (7)$$

Выражение (7) описывает спектр действия на сооружение данного конкретного колебания грунта.

Для практических целей (сопоставления спектральных кривых) функцию (7) удобно выразить в виде произведения трех функций:

$$A_{зд} = A_0 \cdot \psi(T) \varepsilon(\lambda), \quad (8)$$

где  $A_0$  – сила воздействия, которая соответствует значению  $A_{зд}$  при некоторых фиксированных значениях  $T_0$  и  $\lambda_0$ ;  $\psi(T)$  – спектральный коэффициент;  $\varepsilon(\lambda)$  – коэффициент демпфирования.

В диапазоне периодов колебаний карьерных взрывов спектральный коэффициент равен

$$\psi = \frac{T_0^2}{T_{СБМ}^2}, \quad (9)$$

коэффициент демпфирования

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{2\lambda}}. \quad (10)$$

С учетом (8–10) получим

$$A_{зд} = A_0 \frac{T_0^2}{T_{СБМ}^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\lambda}}, \quad (11)$$

а с учетом (1) и (11) определим амплитуду колебаний грунта в основании охраняемого объекта:

$$A_{гр} = A_0 \frac{\frac{T_0^2}{T_{СБМ}^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\lambda}}}{B_{зд(m)}}. \quad (12)$$

Если перейти от общей записи спектра действия амплитуды колебаний к спектрам действия, выраженным в смещениях маятника, скоростях смещения и в ускорениях, то их максимальные значения будут выглядеть соответственно следующим образом:

$$a_{\max} = a(T, \lambda); \quad (13)$$

$$U_{\max} = U(T, \lambda); \quad (14)$$

$$W_{\max} = W(T, \lambda). \quad (15)$$

С учетом (14) выражение (12) будет иметь вид

$$U_{\text{доп}} = U_0 \frac{C}{B_{зд(m)}}, \quad (16)$$

где  $a_{\max}$  – максимальное смещение маятника, см;  $W_{\max}$  – максимальное ускорение, см/с<sup>2</sup>;  $U_{\text{доп}}$  – допустимая скорость колебания грунта в основании здания с учетом частотной характеристики колебательной системы, см/с;  $U_0$  – допустимая скорость колебания грунта в основании сооружения без учета частотной характеристики колебательной системы, см/с (берется из табл. 31, с. 227 работы [8] или из других литературных источников [6, 13, 14, 17]);

$C = \frac{T_0^2}{T_{СБМ}^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\lambda}}$ ;  $B_{зд(m)}$  – амплитудно-частотная характеристика колебательной системы.

В табл. 3 и на рис. 2 представлены результаты расчетов допустимой скорости смещения грунта в основании охраняемого объекта с использованием формулы (16). Зависимости  $U_{\text{доп}}$  от  $T/T_0$  (рис. 2) относятся только к скорости смещения грунта в основании сооружения  $U_0 = 1$  см/с. При использовании зависимостей для определения  $U_{\text{доп}}$  для других значений  $U_0$  необходимо величину  $U_{\text{доп}}$ , которая определена при  $U_0 = 1$  см/с, умножить на соответствующее значение  $U_0$ .

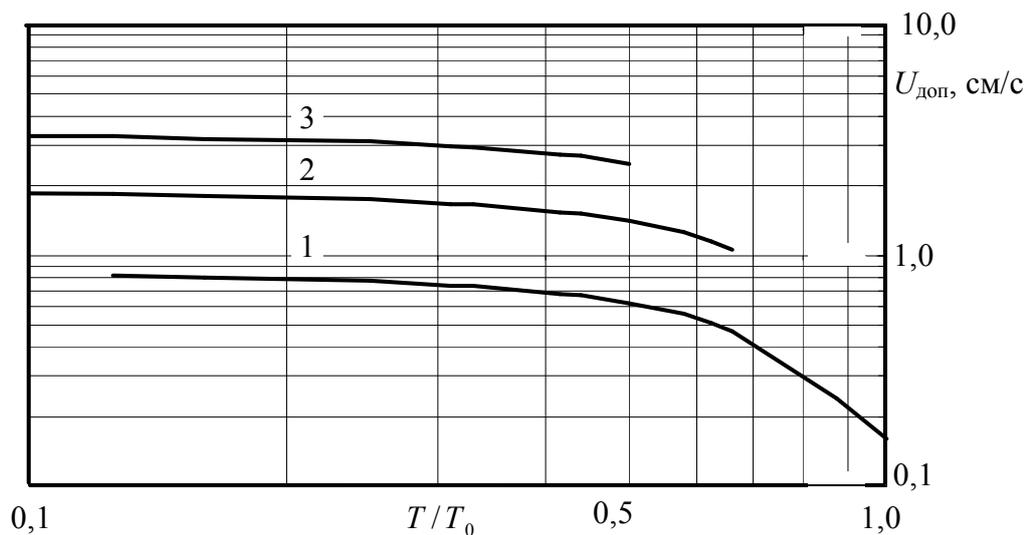


Рис. 2. Зависимость допустимой скорости смещения сооружения от при  $U_0 = 1$  см/с и  $T_0 = 0,2$  с (1),  $T_0 = 0,3$  с (2),  $T_0 = 0,4$  с (3)

Данные, представленные в табл. 3 и на рис. 2, свидетельствуют о том, что в зависимости от величины отношения  $T/T_0$  и значения коэффициента демпфирования  $U_{\text{доп}}$  изменяется в 1,5...5 раз, что подтверждает необходимость учета амплитудно-частотной характеристики колебательной системы при ведении ВР вблизи сооружений.

Для оперативного определения допустимой скорости смещения грунта в основании охраняемого объекта с учетом частотной характеристики колебательной системы разработана специальная номограмма (рис. 3).

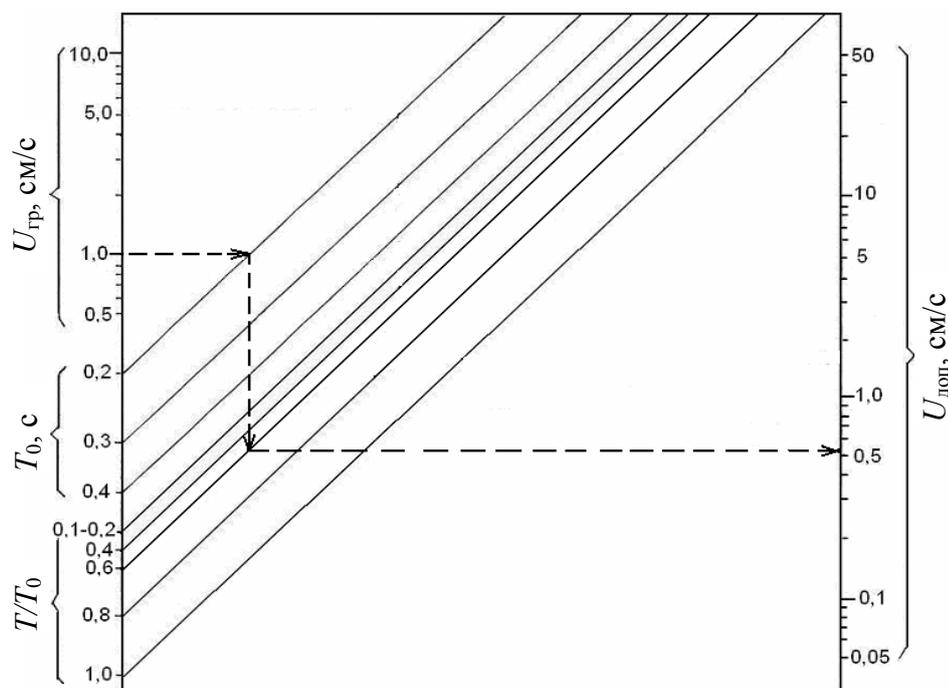


Рис. 3. Номограмма для определения  $U_{\text{доп}}$  с учетом частотных характеристик колебаний грунта и сооружения

Таблица 3. Допустимая скорость смещения грунта в основании охраняемого объекта с учетом амплитудно-частотной характеристики колебательной системы грунт–сооружение

$T_0$ , с	$U_{гр}$ , см/с, для зданий III класса	$U_{доп}$ при $\lambda = 0,3$ и следующих значениях $T/T_0$ :														
		0,0625	0,08	0,125	0,16	0,25	0,31	0,33	0,416	0,44	0,5	0,58	0,625	0,66	0,875	1,0
0,2	7	–	–	5,71	5,6	5,4	5,18	5,18	4,76	4,69	4,37	3,92	3,57	3,29	1,68	1,1
	5	–	–	4,08	4	3,9	3,7	3,7	3,4	3,35	3,12	2,8	2,55	2,35	1,2	0,78
	3	–	–	2,45	2,4	2,34	2,22	2,22	2,04	2,11	1,87	1,68	1,53	1,41	0,72	0,47
	2	–	–	1,63	1,6	1,56	1,48	1,48	1,36	1,34	1,25	1,12	1,02	0,94	0,48	0,31
	1	–	–	0,82	0,8	0,78	0,74	0,74	0,68	0,67	0,625	0,56	0,51	0,47	0,24	0,16
	0,5	–	–	0,41	0,4	0,39	0,37	0,37	0,34	0,33	0,31	0,28	0,25	0,23	0,12	0,078
0,3	7	–	13,02	12,88	12,6	12,25	11,69	11,62	10,78	10,57	9,87	8,82	8,05	7,42	–	–
	5	–	9,3	9,2	9	8,75	8,35	8,3	7,7	7,55	7,05	6,3	5,75	5,3	–	–
	3	–	5,58	5,52	5,4	5,25	5,01	4,98	4,62	4,53	4,23	3,78	3,45	3,18	–	–
	2	–	3,72	3,68	3,6	3,5	3,34	3,32	3,08	3,02	2,82	2,52	2,3	2,12	–	–
	1	–	1,86	1,84	1,8	1,75	1,67	1,66	1,54	1,51	1,41	1,26	1,15	1,06	–	–
	0,5	–	0,93	0,92	0,9	0,87	0,83	0,83	0,77	0,75	0,7	0,63	0,57	0,53	–	–
0,4	7	23,1	23,1	22,89	22,4	21,77	20,79	20,58	19,11	18,9	17,5	–	–	–	–	–
	5	16,5	16,5	16,35	16	15,55	14,85	14,7	13,65	13,5	12,5	–	–	–	–	–
	3	9,9	9,9	9,81	9,6	9,33	8,91	8,82	8,19	8,1	7,5	–	–	–	–	–
	2	6,6	6,6	6,54	6,4	6,22	5,94	5,88	5,46	5,4	5	–	–	–	–	–
	1	3,3	3,3	3,27	3,2	3,11	2,97	2,94	2,73	2,7	2,5	–	–	–	–	–
	0,5	1,65	1,65	1,63	1,6	1,55	1,48	1,47	1,36	1,35	1,25	–	–	–	–	–

Используя значение допустимой скорости смещения грунта в основании сооружения  $U_{\text{доп}}$ , см/с, полученное по формуле (16), можно определить допустимую одновременно взрываемую массу заряда при технологических взрывах по методу сосредоточенного заряда [18]

$$Q_{\text{доп}} = \left( \frac{U_{\text{доп}}}{K} \right)^{3/n} r^3 \quad (17)$$

или по методу рассредоточенного заряда [19]

$$Q_{\text{доп}}^{\text{эф}} = \left( \frac{U_{\text{доп}}}{mK} \right)^{3/n} r^3. \quad (18)$$

Применимость новой методики учета частотных характеристик колеблющихся объектов при взрывах рассмотрим на конкретном примере.

На уступе карьера в гранитах крепостью  $f = 8 \dots 9$  (скорость распространения продольной волны 4000 м/с) необходимо произвести массовый взрыв. Вертикальные скважины диаметром 250 мм предполагается заполнить на 8 м зарядами ВВ, состоящими из игданита. В тылу взрываемого блока на расстоянии 500 м находится жилой поселок, застроенный кирпичными и блочными зданиями, многие из которых имеют косые трещины в несущих стенах. Требуется определить сейсмобезопасную массу заряда, взрываемую одновременно, в одной ступени замедления.

**Решение.** Согласно предыдущим исследованиям периоды собственных колебаний рассматриваемых зданий поселка можно принять на уровне 0,2 с. Периоды максимальных по амплитуде колебаний грунта при массовом взрыве определяем по формуле (3), они будут составлять 0,12 с. Отношение  $T/T_0 = 0,6$ .

Согласно СНиП [8] жилые здания поселка относятся к III классу сооружений, и с учетом характеристики их состояния допустимая скорость колебания грунта в их основаниях без учета частотных характеристик зданий равна 1,0 см/с, то есть  $U_0 = 1$  см/с.

Далее по формуле (6), с использованием данных табл. 3 или по пунктирным линиям номограммы (см. рис. 2 и 3) определяем допустимую скорость колебания грунта в основаниях зданий с учетом частотных характеристик зданий и грунта. Она составляет 0,54 см/с.

По формуле (17) [18] определяем сейсмобезопасную массу заряда, кг:

$$Q_{\text{доп}} = \left( \frac{U_{\text{доп}}}{K} \right)^{3/n} r^3 = \left( \frac{0,54}{190} \right)^2 500^3 = 1000.$$

### Выводы

В результате исследования влияния АЧХ колебательной системы на величину динамической нагрузки на сооружение впервые в практике проведения технологических взрывов разработана методика расчета допустимых усилий на конструкции сооружения с учетом частотных

характеристик колебаний грунта и охраняемого объекта. Положения разработанной методики доведены до инженерных зависимостей.

1. *Housner G. W.* Interaction of Bulding and Ground during an Earthquake. – Bull. S.S.A., 1957. – № 3. – Vol. 47.
2. *Назаров А. Г.* Метод инженерного анализа сейсмических сил. – Ереван: Изд. АН Армянской ССР, 1959.
3. *Синицын А. П.* Практические методы расчета сооружений на сейсмические нагрузки. – М.: Стройиздат, 1987.
4. *Медведева Е. С.* Воздействие сейсмических волн на фундамент сооружения. – Матер. Всес. совещ. «Проектирование и строительство сейсмостойких зданий и сооружений». – М.: ЦНИИСК, 1971.
5. *Каранетян Б. К. и др.* Результаты исследования взаимодействия между основанием и фундаментом зданий в натуре при сейсмических колебаниях. – Изв. АН Армянской ССР. Науки о Земле. – 1973. – Т. XXIV. – № 4.
6. *Сафонов Л. В., Кузнецов Г. В.* Сейсмический эффект взрыва скважинных зарядов. – М.: Наука, 1967. – 102 с.
7. *Мионов П. С.* Взрывы и сейсмотехника сооружений. – М.: Недра, 1973. – 168 с.
8. *Мосинец В. Н.* Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах. – М.: Недра, 1976. – 271 с.
9. *Цейтлин Я. И., Смолий Н. И.* Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов. – М.: Недра, 1981. – 192 с.
10. *Богацкий В. Ф., Фридман А. Г.* Охрана инженерных сооружений и окружающей среды от вредного действия промышленных взрывов. – М.: Недра, 1982. – 162 с.
11. *Волновые процессы в конструкциях зданий при сейсмических воздействиях* / Под ред. В. А. Кривелева. – М.: Наука, 1987. – 158 с.
12. *Сейсмостойкость сооружений* / К. С. Абдурашидов, Я. М. Айзенберг, Т. Ж. Жунусов и др. – М.: Наука, 1989. – 192 с.
13. *Безопасность взрывных работ в промышленности* / Под ред. Б. Н. Кутузова. – М.: Недра. – 1992, 544 с.
14. *Kuzmenko A. A., Vorobev V.D., Denisjuk I. I., Davetas A. A.* Seismik Effect of Blasting in Rock. – Oxford and IBN Publishing Co. – Pvt. Ltd. – Nev Delhi, 1993. – 169 p.
15. *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.
16. *Бойко В. В., Кузьменко А. А., Хлевнюк Т. В.* О критериях сейсмической опасности промышленных взрывов // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»: Зб. наук. праць. – К.: НТУУ «КПІ». – 2005. – Вип. 12. – С. 45–52.
17. *Медведев С. В.* Инженерная сейсмология. – М.: Госстройиздат. – 1962. – 282 с.

18. *Вовк А. А., Кузьменко А. А.* О временных параметрах сейсмозрывных волн // Прикладна гідромеханіка. – 2002. – 4(76). – № 2. – С. 9–13.
19. *Кузьменко А. А., Воробьев В. Д.* Обеспечение безопасного взрывания в карьерах строительных материалов // Институт гидромеханики АН Украины. – К., 1992. – 24 с. – Деп. в УкрИНТЭИ 11.08.1992 г., № 1192-УК92.
20. *Медведев С. В.* Сейсмика горных взрывов. – М.: Недра, 1964. – 188 с.
21. *Вовк А. А., Кузьменко А. А.* Сейсмическое действие взрыва рассредоточенного заряда // Прикладна гідромеханіка. – 2001. – Т. 3(75), № 2. – С. 5–9.