

## ОБОСНОВАНИЕ СЕЙСМОБЕЗОПАСНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЗРЫВА В СКАЛЬНЫХ ПОРОДАХ С ПОКРЫВАЮЩИМИ ГРУНТАМИ

*Н. И. Жукова, инж., В. Д. Воробьев, докт. техн. наук, А. И. Крючков, канд. техн. наук (НТУУ «КПИ»)*

*Викладені результати теоретичних і експериментальних досліджень з обґрунтування сейсдобезпечної маси вибухових речовин під час вибухів у скельних породах, покритих м'якими ґрунтами, на яких розташовані об'єкти, що охороняються. Розглянуто випадок розташування фундаменту споруд одночасно на м'якій ґрунтовій та скельній основах.*

*Ключові слова: безпека, вибух, ґрунт, скельна порода, сейсмічна хвиля, споруда.*

*Изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований по обоснованию сейсдобезопасной массы взрывчатых веществ при взрывах в скальных породах с покрывающей толщей мягких грунтов, на которых расположены охраняемые объекты. Рассмотрен случай расположения фундамента сооружения одновременно на грунтовом и скальном основаниях.*

*Ключевые слова: безопасность, взрыв, грунт, скальная порода, сейсмическая волна, сооружение.*

*Results of theoretical and experimental studies to establish the seismically safe mass of explosives during explosions in rocks, with thickness of soft soil where protected objects are located are put forth. The case when the building foundation is disposed on the soil and rock bases simultaneously is considered.*

*Key words: safety, explosion, soil, rock, seismic wave, building.*

**Введение.** Производство взрывных работ в карьерах, особенно вблизи объектов промышленного и гражданского назначения, связано с обязательным соблюдением требований, которые регламентируют «Единые правила безопасности при взрывных работах» [1]. Решение этой задачи достигается применением короткозамедленного взрывания (КЗВ) как наиболее безопасного и эффективного метода управления энергией взрыва, включающего современные научно обоснованные методики расчета его параметров, безопасные и эффективные типы взрывчатых веществ (ВВ), средства и способы инициирования зарядов [2–6]. Однако, несмотря на достигнутые в настоящее время положительные теоретические результаты и накопленный значительный объем экспериментальных данных по КЗВ горных пород, разработанные на их основе практические рекомендации по расчету параметров промышленного взрыва для стесненных условий карьеров в ряде случаев не могут быть использованы. Причиной этого является отрицательное влияние на охраняемые объекты, находящиеся в зоне действия взрыва, поражающих факторов взрыва [7]: ударной воздушной волны, сейсмоэффекта, разлета кусков породы и в некоторых случаях газообразных продуктов. Критерии оценки этих факторов

при проектировании параметров взрывных работ в конкретных условиях требуют специального обоснования.

Практика взрывных работ в стесненных условиях разработки месторождений полезных ископаемых (особенно нерудных) показывает преобладающее воздействие на здания и сооружения сейсмoeffекта промышленного взрыва [8, 9]. В этом случае, как правило, с привлечением специалистов определяется сейсмобезопасная масса ВВ с помощью сейсмометрических исследований.

Степень воздействия сейсмических волн на здания и сооружения определяется их интенсивностью и спектром вынужденных колебаний, прочностью и динамическими характеристиками объектов, динамическими свойствами и особенностями геологического строения горного массива, характером взаимодействия грунта и сооружений [2, 8].

Влияние различных природных и технологических факторов на интенсивность распространения сейсмических волн и устойчивость охраняемых объектов достаточно полно освещено в сборнике статей [10]. Полученные выводы и практические рекомендации могут успешно использоваться при решении задач горной сейсмике в практике работы карьеров с рассмотренными в [10] аналогичными условиями и способами ведения взрывных работ.

Необходимо отметить, что характерной особенностью при взрывах в скальных породах в условиях карьеров является наличие покрывающих мягких (вскрышных) грунтов. В зависимости от мощности и физико-механических свойств мягких грунтов, покрывающих скальное основание, изменяются и параметры сейсмических колебаний. Наличие этого слоя пород оказывает сильное демпфирующее действие, снижая параметры сейсмических колебаний при взрывах [11]. Показано, что с увеличением мощности песчаного слоя снижается уровень колебательного процесса. Например, при мощности слоя песка в пределах 0–10 м скорость смещения  $U$  уменьшается на 40 %, а энергия  $E$  – на 63 %; в пределах 1–25 м дальнейшее снижение величин  $U$  и  $E$  достигает 30 % [11].

Таким образом, установленные закономерности влияния различных факторов на характер распространения сейсмических волн и предлагаемые методики расчета сейсмобезопасных параметров взрыва, приведенные в работах [2–12], отражают физическую сущность данного процесса применительно к рассмотренным условиям. Однако выводы и рекомендации по результатам указанных исследований не могут быть в полной мере использованы в условиях отработки скальных уступов мощностью, изменяющейся относительно линии горизонта карьера (нижняя часть по подошве верхнего скального уступа). В этом случае линия верхней части по длине этого уступа может иметь различную конфигурацию, в ряде случаев с выходом на дневную поверхность (выклинивание скального массива). Тогда верхняя поверхность участка уступа скальных пород либо с одной, либо с обеих сторон может быть пригружена слоем мягких грунтов. Обоснование закономерностей распространения вынужденных колебаний в таких условиях

и разработка на их основе практических рекомендаций по сейсмобезопасному ведению взрывных работ является довольно сложной задачей.

**Цель работы** – обоснование сейсмобезопасных параметров взрывных работ при отработке уступов скальных пород с покрывающими мягкими грунтами в условиях нерудных карьеров.

**Изложение результатов исследований.** Условия разработки месторождений скальных пород карьерами могут быть различными. Они характеризуются геологическим строением горного массива, свойствами скальных и вскрышных пород, местом расположения охраняемых объектов относительно взрываемого уступа на горизонте карьера (рис. 1). В зависимости от взаимосвязи этих факторов между собой возникает и необходимость научного обоснования закономерностей распространения сейсмических волн и воздействия их энергии на расположенные вблизи от места производства взрыва охраняемые объекты.

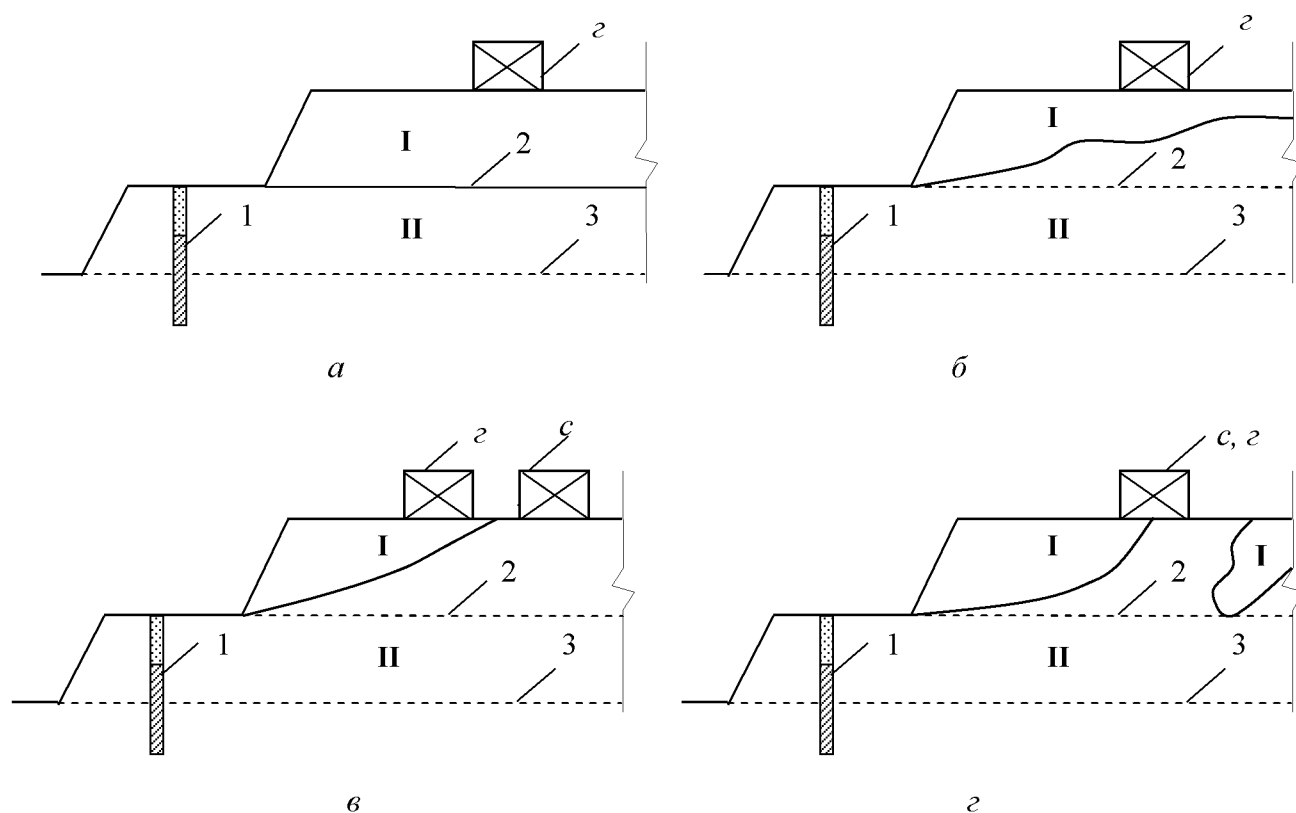


Рис. 1. Характерные схемы взаимного расположения мест производства взрывов (I) и охраняемых объектов (2) на уступах карьера при наличии мягких (I) и скальных (II) горных пород: 2 – объект на грунтовом основании; с – объект на скальном основании; с, 2 – то же, одновременно на скальном и грунтовом основании; 2, 3 – линии (отметки) горизонтов карьера, соответственно, верхнего и нижнего

*О критериях опасности сейсмического действия взрыва.* Под критерием опасности действия сейсмических волн на здания и сооружения понимается такой параметр, который наилучшим образом коррелирует с повреждением определенного класса охраняемых объектов. Этот критерий позволяет судить о мере опасности сейсмических колебаний для сооружения. В практике

сейсмическую опасность можно оценивать по величине амплитуды, ускорения, удельной энергии, максимальной векторной скорости смещения частиц грунта (для зданий) и напряжения (для скальных пород и бетона) [8, 13]. Однако при решении задач горной сейсмики в качестве критерия опасности воздействия на объект используют величину скорости смещения грунта  $U$  как наиболее удобную характеристику сейсмoeffекта по той причине, что деформации зданий от воздействия взрыва прямо пропорциональны скорости колебаний частиц грунта и обратно пропорциональны частоте собственных колебаний [14]. Соотношение  $U_v \leq U_{\text{пд}}$  (где  $U_v$  и  $U_{\text{пд}}$  – возможная и предельно допустимая скорости колебания грунта, м/с) является общим принципом обеспечения устойчивости охраняемых объектов [15].

Зная величину  $U$ , можно определить возникающие в горном массиве напряжения. При критической  $U_{\text{кр}}$  скорости колебаний напряжение в массиве превышает предел прочности пород на растяжение, что приводит к их разрушению, а следовательно, и к возможному нарушению находящихся на их поверхности различных объектов. В зависимости от места расположения объекта на поверхности и подстилающих его основание грунтов, условий залегания основной взрываеваемой породы на месторождении (карьере), контура взрываеваемых пород на границе раздела скала–мягкий грунт и других факторов изменяется и несомая сейсмической волной энергия. При этом ее максимум (68 %) наблюдается в поверхностной волне, а минимум – в продольной (7 %). Поперечная волна несет 25 % энергии [8]. Общая энергия сейсмических волн, воздействующих на объект, равна сумме энергий указанных выше трех типов волн. При этом сейсмобезопасность взрывов повышается в том случае, когда волновой пакет имеет минимальные энергетические характеристики на частотах, совпадающих с частотой собственных колебаний объектов.

Частота собственных колебаний для наиболее распространенных конструкций сооружений находится в диапазоне 0,2–7 Гц. С повышением энергонасыщенности этой части спектра сейсмической волны увеличивается и возможность возбуждения резонансных колебаний, что может привести к повреждению или разрушению охраняемого объекта. Сейсмоколебания при взрыве вследствие резонанса могут увеличиваться в три–четыре раза, а иногда и более [8].

При ведении взрывных работ в карьерах охраняемые объекты промышленного и гражданского назначения могут находиться как на грунтовом, так и на скальном основании (см. рис. 1). Степень воздействия сейсмических волн на объекты в этих случаях определяется свойствами мягких (слабых) и скальных пород, параметрами (гипсометрия, мощность слоя) их взаимного залегания, обводненностью, расстоянием до объекта и его конструкцией.

При переходе сейсмозрывной волны из скальных пород в мягкие поглощение энергии колебаний в последних с расстоянием будет увеличиваться по сравнению с первыми, и разница для обоих типов пород будет уменьшаться. Обоснование закономерностей изменения параметров сейсмических колебаний при взрывах в слое (уступе) скальных пород с переменной мощностью (см. рис. 1, б) по сравнению с постоянной (см. рис. 1, а) усложняется. Еще

более сложная картина может наблюдаться при обработке слоя скальных пород с выходом их на дневную поверхность (см. рис. 1, в, 1, з). Процесс распространения сейсмических волн в таких условиях имеет сложную волновую картину (многократное преломление и отражение на границах раздела, наложение последующих волн на предыдущие), что приводит к резонансным явлениям. Применительно к рассматриваемым вариантам расположения охраняемых объектов при взрывах на карьерах, приведенных на рис. 1, б, 1, в, 1, з, нет четкого теоретического объяснения закономерностей распространения сейсмических волн. Известные решения в данном направлении [2, 8–15] достаточно полно обоснованы и могут быть применены к широко распространенной схеме в практике уступной обработки скальных пород (см. рис. 1, а).

В общем случае охраняемые объекты, как правило, располагаются на слоистом грунтовом массиве. Главную роль при этом играет верхний слой грунта, на который опирается фундамент сооружения. Кинематические параметры этого слоя зависят от физико-механических и акустических свойств нижележащих слоев мягких грунтов или скальных пород, оказывающих существенное влияние на частоту и амплитуду колебаний верхнего слоя. Если грунтовое основание однородное, то его можно характеризовать величиной собственного периода колебаний  $T_0 = 4H/C_s$  (где  $H$  – высота основания, м;  $C_s$  – скорость распространения поперечной волны, м/с). При наличии двухслойного грунтового основания собственные частоты колебаний определяются из системы волновых уравнений [16]

$$G_i \frac{\partial^2 \varepsilon_i}{\partial x^2} - \rho_i \frac{\partial^2 \varepsilon_i}{\partial t^2} = 0, \quad i = 1, 2 \quad (1)$$

и условий неразрывности на границе слоев:

$$\begin{aligned} x &= H_1; \\ \varepsilon_1(x, t) &= \varepsilon_2(x, t); \\ \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial x} &= \frac{\partial \varepsilon_2}{\partial x}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $G_i$  – модуль сдвига  $i$ -го слоя пород;  $\varepsilon_i(x, t)$  – деформация сдвига  $i$ -го слоя (для  $i = 1, 2$ );  $H_i$  – мощность  $i$ -го слоя, м.

Граничными условиями при этом являются:

$$\text{при } x=0, \quad \frac{\partial \varepsilon(x, t)}{\partial x} = 0; \quad (3)$$

$$\text{при } x=H=H_1+H_2, \quad \varepsilon_2(H, t)=0. \quad (4)$$

Характеристическое уравнение системы (1) с уравнениями (2)–(4) для определяющих периодов колебаний  $T_0$  оснований объектов определяется из решения трансцендентного уравнения:

$$\sqrt{\frac{\rho_1 G_1}{\rho_2 G_2}} \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} B_1 \cdot \operatorname{tg} \frac{2\pi}{T_0} B_2 - 1 = 0, \quad (5)$$

где  $\rho$  – плотность слоя пород,  $\text{кг/м}^3$ ; величина  $\sqrt{\sigma_i/\rho_i} = C_{si}$  – скорость волны сдвига  $i$ -го слоя,  $\text{см/с}$ ;  $B_i = H_i \sqrt{\rho_i/G_i}$ .

Из анализа (5) видно, что период собственных колебаний грунта сложного строения под фундаментом сооружения зависит как от мощности и плотности слоев пород, так и от скорости распространения волн сдвига.

При переходе сейсмической волны из более плотного в менее плотный слой пород происходит увеличение периода (уменьшение частоты) колебаний, что является нежелательным явлением с точки зрения сейсмостойкости объекта. В подтверждение этому можно привести пример: нижний взрываемый слой – гранит с характеристиками:  $C_s = 1800 \text{ м/с}$ ,  $H_2 = 30 \text{ м}$ ,  $\rho_2 = 2650 \text{ кг/м}^3$ ,  $T_0 = 0,67 \text{ с}$ ; верхний слой – глина с характеристиками:  $C_s = 300 \text{ м/с}$ ,  $H_1 = 20 \text{ м}$ ,  $\rho_1 = 2000 \text{ кг/м}^3$ ,  $T_0 = 2,59 \text{ с}$ . Тогда период колебаний скального массива пород, согласно формуле (5),  $T_0 = 0,961 \text{ с}$ , что соответствует частоте колебаний  $6,54 \text{ Гц}$ , лежащей в наиболее опасной зоне частот. С уменьшением мощности верхнего слоя пород происходит уменьшение периода колебаний. Например, при  $H_1 = 3 \text{ м}$   $T_0 = 0,525 \text{ с}$ , что соответствует частоте колебаний  $11,97 \text{ Гц}$ . Приведенные данные подтверждают вывод о том, что поверхностный слой грунта играет главную роль в формировании колебательного процесса при производстве взрывов в массивах скальных пород. При этом устойчивость объекта при воздействии на него сейсмозрывной волны определяется амплитудой скорости смещения частиц грунта и частотой колебаний [14].

В работе [12] обобщаются результаты теоретических расчетов и указывается, что покрывающий слой грунта аналогичен узкополосному фильтру, способствующему распространению сейсмических волн определенной частоты. Наиболее опасному диапазону частот в пределах  $5\text{--}15 \text{ Гц}$  соответствует мощность покрывающего слоя грунтов  $10\text{--}30 \text{ м}$  (рис. 2). Этот слой определяет колебания с той частотой, которые в нем усиливаются, а величина амплитуды зависит от ее значения в исходной волне при распространении в скальной породе. Поэтому получение достоверных данных, в основном о величине скорости распространения сейсмических волн для обоснования безопасных параметров взрывных работ достигается с помощью сейсмометрических измерений.

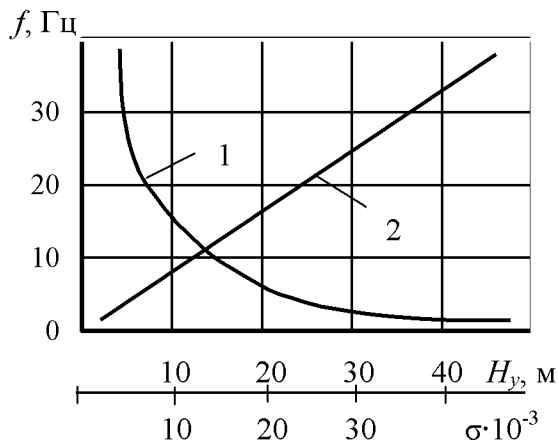


Рис. 2. Зависимость изменения частоты колебаний  $f$  от мощности слоя мягких грунтов  $H_1$  (1) и коэффициента поглощения  $\sigma$  (2)

*Результаты экспериментальных исследований и их анализ\**. Эксперименты по сейсмическому действию массовых взрывов на охраняемые объекты проведены в условиях разработки гранитов на карьере № 2 Сарненского завода дорожно-строительных материалов (Ровенская обл.) [17, 18]. Участок местности в направлении от карьера до охраняемых объектов (камнедробильный цех – КДЦ № 2 и средняя школа) по своему строению является неоднородным. Наносная порода представлена растительным слоем, песком и суглинком мощностью от 5 до 14 м. Подстилающими для этих грунтов являются в различной степени трещиноватые граниты мощностью до 80 м с чередованием зон слабой и сильной трещиноватости через 20–50 м. В некоторых местах граниты имеют выход на дневную поверхность. Соответственно зонам трещиноватости чередуются и зоны скоростей  $C_p$ : от 4,7 до 6,5 км/с и от 3,3 до 4,7 км/с.

Здание цеха крупного дробления (КДЦ № 2) с железобетонным каркасом высотой 14 м относится к 3-му классу по сейсмостойкости и расположено от карьера № 2 на расстоянии 500 м (рис. 3). Периоды собственных колебаний здания вдоль длинных сторон 0,2 с, коротких – 0,12 с. Величина  $U_{\text{доп}}$  в основании здания равна 5 см/с.

Здание школы – трехэтажное кирпичное, длиной 68 м и шириной 16 м. Высота этажа 3,2 м, период собственных колебаний здания составляет 0,13–0,15 с, величина  $U_{\text{доп}} = 0,5$  см/с. Здание школы относится ко 2-му классу устойчивости и находится на расстоянии, равном 1350 м (см. рис. 3).

Для проверки и изыскания путей снижения воздействия сейсмических волн на КДЦ-2 (первый этап исследований) были проведены замеры скорости колебания грунта, фундамента корпуса и его железобетонных конструкций при массовом взрыве на карьере № 2 (горизонт +157 м). Основные параметры взрыва: общая масса ВВ  $Q_0 = 28240$  кг, максимальная масса ВВ в группе замедления  $Q_{\text{гр}} = 2124$  кг, максимальное количество зарядов в группе

\* Эксперименты и обработка их результатов выполнены совместно с канд. техн. наук А. А. Кузьменко [17, 18]

$Q_{гр.маx} = 6$ , общее количество зарядов  $N_3 = 79$ , время замедления между группами зарядов  $t_3 = 50$  мс.

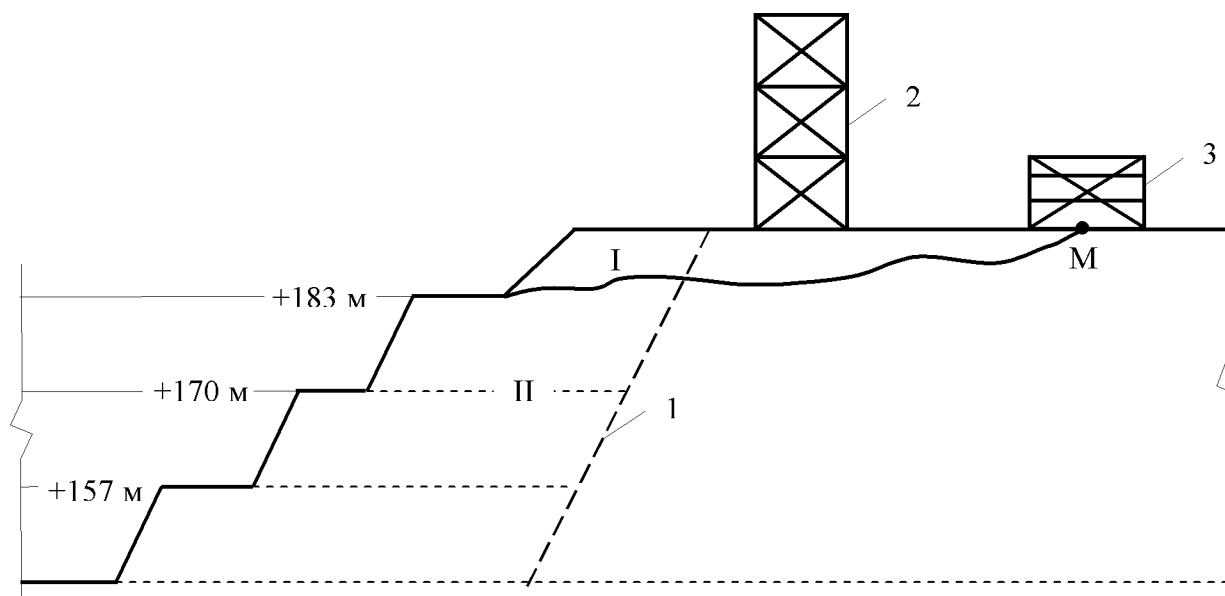


Рис. 3. Схема расположения охраняемых объектов относительно гранитного карьера № 2: 1 – граница горного отвода; 2 – КДЦ-2; 3 – здание школы; I, II – тоже, что на рис. 1; M – граница скала–грунт

Сейсмоизмерения проводились по известной методике [18] путем установки сейсмоприемников СМ-3 на грунте по профилю измерений в направлении от КДЦ-2 к взрываемому блоку, на фундаменте в здании КДЦ-2 и железобетонной колонне на высоте 6,3 и 12 м. Скорость смещения в сейсмической волне регистрировалась осциллографом НО44.3 с помощью гальванометров МО17/400. В каждой точке устанавливались два сейсмоприемника для записи по составляющим скорости смещения:  $Z$  – вертикальной и  $X$  – горизонтальной (радиальной). Волновые процессы в виде выкопировки осциллограммы о записях датчиков  $3x-6x$  представлены на рис. 4, параметры этого процесса приведены в табл. 1 [17].

Из анализа полученных результатов видно, что первым вступлением волнового процесса является продольная волна  $P$ . За этой волной приходит очень сложный цуг волн, образованный продольной, поперечной волнами и их отражениями как от границы раздела грунтовой и скальной пород, так и от дневной поверхности. В общей картине волнового процесса наблюдается также интерференция волн за счет КЗВ зарядов. Заканчивается волновой процесс поверхностной волной  $R$ , образованной в результате взрыва последней группы в серии зарядов. Воздействие сейсмозрывных волн на сооружения продолжается 2 с (серия зарядов ВВ состояла из 26 групп).



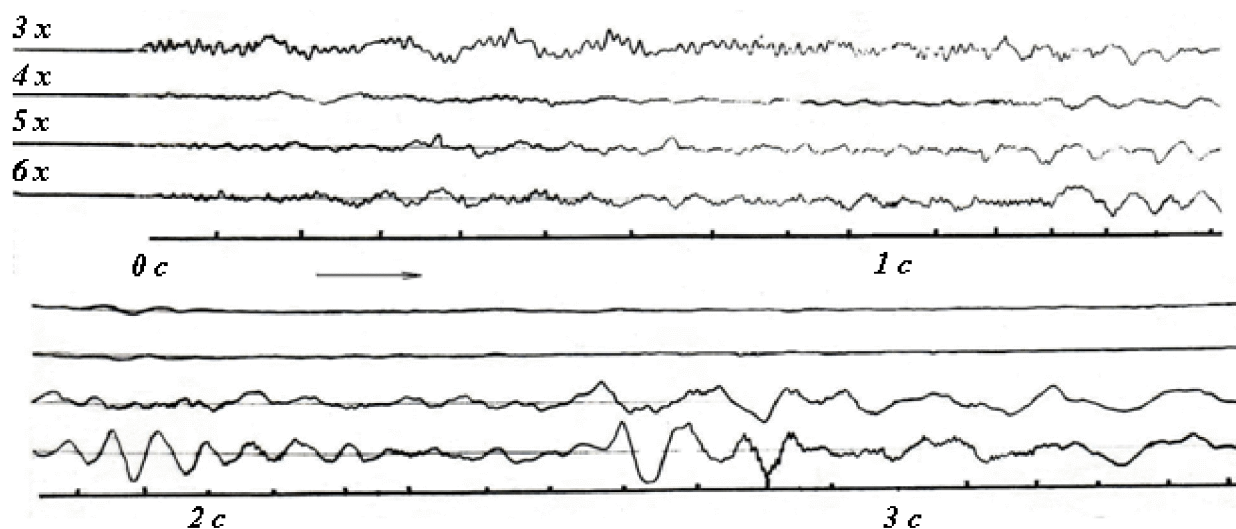


Рис. 4. Сейсмограмма массового взрыва на карьере № 2 с записью колебательного процесса при установке датчиков: 3x – на грунте; 4x – фундаменте КДЦ-2; 5x, 6x – несущей колонне на высоте  $h$ , соответственно 6,3 и 12 м

Величина скорости смещения в интерференционной волне  $U_{И(x)}$  в зависимости от относительного расстояния  $\bar{r}$  выражается формулой

$$U_{И(x)} = 120 \bar{r}^{-1,37}, \quad K_{\text{ВАР}} = 29,6 \%. \quad (6)$$

Таблица 1. Данные обработки осциллограммы массового взрыва

№ датчика	Место установки датчика	$r$ , м	$U$ , см/с (в волне)			Интенсивность раскачки, см/с	$T$ , с (массива в волне)			$T_0$ , с (здание)
			$P$	$R$	в интерференционной волне		$P$	$R$	в интерференционной волне	
2	Грунт	325	0,79	0,73	1,56	–	0,016	0,075	0,071	–
3	То же	550	0,74	0,52	0,93	–	0,016	0,070	0,085	–
4	Фундамент здания	600	0,56	0,51	0,95	–	0,016	0,065	0,052	–
6	Ж/б колонна, $h = 12$ м	600	0,33	0,26	0,89	0,41	0,022	0,075	0,023	–
1	Грунт	275	1,68	1,29	2,10	–	0,022	0,050	0,065	–
2	То же	385	–	1,29	0,91	–	–	0,065	0,080	–
3	То же	550	0,21	0,47	1,02	–	0,018	0,075	0,125	–
4	Фундамент здания	600	–	0,31	0,38	–	–	0,075	0,100	–
5	Ж/б колонна, $h = 6,3$ м	600	–	0,60	0,74	1,15	–	0,080	0,055	0,080–0,195
6	То же, $h = 12$ м	600	0,10	0,95	0,70	2,53	0,01	0,070	0,055	0,080–0,185

Данные табл. 1 свидетельствуют о том, что величина  $U$  при взаимодействии волн с фундаментом здания уменьшается (по составляющей  $X$ ): в интерференционной волне – в 2,7 раза, в волне  $R$  – в 1,5 раза. С увеличением высоты

здания колебания становятся более интенсивными по сравнению с колебаниями фундамента: в 2 раза в интерференционной волне и в 3 раза в волне  $R$ .

После прекращения волнового воздействия на здание КДЦ-2 (примерно через 2 с) наблюдается его раскачивание по составляющей  $X$  еще в течение 2 с с периодом от 0,08 до 0,195 с и амплитудами, в 2,5 раза превышающими аналогичные амплитуды колебаний при прохождении волн по грунту и несущей железобетонной колонне на высоте 12 м, и в 8 раз – амплитуды колебаний фундамента здания. При этом период собственных колебаний здания находится в пределах 0,185...0,195 с, а максимальных вынужденных – 0,1...0,125 с. По вертикальной составляющей  $Z$  раскачивание здания практически отсутствует.

На втором этапе экспериментальных исследований выполнены замеры по воздействию сейсмических волн на здания КДЦ-2 и средней школы при производстве массовых взрывов на гор.+170 м и +157 м карьера №2 (см. рис. 3). Инструментальные замеры по определению параметров сейсмозрывных волн проводились по той же методике, что и на первом этапе исследований (табл. 2).

Таблица 2. Параметры массовых взрывов и результаты обработки экспериментальных данных для составляющей  $X$

Место установки датчика	$Q_{гр.мав}$ кг	$n_{см}$	$t_3$ , мс	$r$ , м	$U_{max}$ , см/с	$T$ , с	$U_0$ , см/с	$T_0$ , с
Школа, грунт (П)	1664	9	35,50	1470	0,30	0,120	–	–
То же, 3-й этаж				1470	0,29	0,156	–	0,14
Здание КДЦ-2, грунт	2250	13	35	715	0,31	0,118	–	–
То же, ж/б каркас, $h = 6,3$ м				725	0,51	0,118	0,72	0,19
То же, грунт	2124	26	50	475	1,02	0,125	–	–
То же, ж/б каркас, $h = 12$ м				500	0,95	0,07	2,53	0,19
Школа, грунт (Л)	2720	11	50	1325	0,26	0,05	–	–
То же (П)				1325	0,42	0,045	–	–
То же (П)	1589	6	50	1090	0,335	0,036	–	–

Примечание. П и Л – соответственно правый и левый торцы здания школы.

При взрывах на горизонте +170 м величина  $U$  грунта изменяется от 0,3 до 1,0 см/с и от 0,5 до 1,1 см/с – в сооружении. Период колебаний при этом составил 0,1...0,125 с при массе заряда ВВ в группе от 2124 до 2250 кг. Скорость смещения грунта в интерференционной и поверхностной волнах в районе размещения КДЦ-2 определяется, соответственно, зависимостями

$$U_{H(X)} = 1350 \bar{r}^{-2}, K_{вар} = 28\%; \quad (7)$$

$$U_{R(X)} = 130 \bar{r}^{-1.5}, K_{вар} = 15,4\%. \quad (8)$$

Из приведенных данных видно, что величина  $U$  в основании здания ( $\sim 1$  см/с) значительно меньше ее допустимой величины (5 см/с). При взрыве на

горизонте +157 м параметры сейсмических волн отличаются незначительно по сравнению с таковыми при взрыве на горизонте +170 м.

Величина  $U_x$  в районе здания школы изменяется от 0,15 до 0,42 см/с. При этом левая часть здания, расположенная на грунте, колеблется со скоростью, в 1,5...2,0 раза большей, чем правая часть, расположенная на скале, что согласуется с результатами исследований [19]. Интенсивность колебаний самого здания практически не изменяется из-за незначительных амплитуд колебаний в приходящей волне. В этом случае раскачивание здания школы отсутствует ( $T_0 > T$ ). На верхних этажах значение  $U$  даже меньше, чем на грунте [18].

Для рассматриваемых условий в районе школы при взрывах на карьере № 2 величина  $U$  в интерференционной волне (см/с)

$$U_{И(X)} = 2,2 \cdot 10^3 \bar{r}^{-1,95}, \quad K_{\text{вар}} = 20,6\% \quad (9)$$

Используя зависимости (6) и (7) при  $U_{\text{доп}} = 0,5$  см/с, можно определить (табл. 3) сейсмобезопасную массу ВВ в грунте  $Q_{\text{гр.макс}}$  (кг) по формуле

$$Q_{\text{гр.макс}} = K_m (U_{\text{доп}} / K)^{3/n} r^3, \quad (10)$$

где  $K_m$  – коэффициент, учитывающий многократность динамических нагрузок;  $n$  – показатель степени затухания ( $n = 1,5 \dots 2,0$ ).

Таблица 3. Сейсмобезопасная масса зарядов ВВ в группе замедления для карьера № 2

Горизонт, м	Расстояние до объекта, м		$Q_{\text{гр.макс}}$ , кг
	КДЦ-2	Школа	
183	400	1150	2250
	425	1175	2700
	450	1200	2900
	475 ... 1150	1225 ... 1350	3200
170	400	1100	2250
	425	1100 ... 1150	2700
	450	1100 ... 1175	2900
	475 ... 1100	1175 ... 1375	3200
157	450 – 900	1025	2300
	то же	1050	2500
	то же	1075	2700
	то же	1100	2900
	то же	1125	3100
	то же	1150 – 1350	3200

Примечания: 1. Расстояния до охраняемых объектов определяются совместно.

2. Количество групп определяется проектом массового взрыва, но не более 12.

**Выводы.** Анализом современных теоретических и экспериментальных достижений в области горной сейсмики установлено отсутствие данных о закономерностях распространения сейсмозрывных волн и практических

рекомендаций по повышению устойчивости охраняемых объектов в стесненных условиях промышленного и гражданского строительства и расположены одновременно на грунтовом и скальном основаниях (в случае выхода скальных пород на дневную поверхность).

Рассмотрены критерии оценки опасности при сейсмическом воздействии промышленных взрывов на охраняемые объекты в условиях карьеров стройматериалов с учетом особенностей распространения сейсмических волн при переходе из скальных пород в покрывающие их грунты. С позиции частотного спектра колебаний отмечена главная роль поверхностного слоя (грунта) в колебательном процессе.

Обобщены данные экспериментальных исследований при взрывах на гранитном карьере № 2 Сарненского завода ДСМ. Факт влияния взрывных работ на устойчивость зданий КДЦ-2 и средней школы (см. табл. 1 и 2) не установлен, поскольку скорость смещения в их основаниях не превышает предельно допустимых норм. Наличие трещин в здании школы объясняется некачественным ее строительством вследствие допущенных нарушений при учете горногеологических факторов на стадии проектирования. Однако в силу того, что грунты и скальная порода под основанием зданий имеют различную частоту колебаний, необходим мониторинг за состоянием охраняемых объектов. Для этих условий даны рекомендации по сейсмобезопасной массе зарядов ВВ (см. табл. 3).

1. *Единые правила безопасности при взрывных работах.* – К.: Норматив, 1992. – 171 с.
2. *Мосинец В. Н.* Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах / Мосинец В. Н. – М.: Недра, 1976. – 271 с.
3. *Карпов М. А.* Применение передовых технологий в области буровзрывных работ / М. А. Карпов, В. Ф. Щербинин // Горный журнал. – 2002. – № 8. – С. 25–27.
4. *Эткин М. Б.* Сейсмический подход к обеспечению безопасности взрывных работ при их проектировании / М. Б. Эткин, А. Е. Азаркович // Горный журнал. – 2002. – № 9. – С. 65–72.
5. *Крысин Р. С.* Современные взрывчатые вещества местного приготовления / Р. С. Крысин, В. Н. Домничев. – Днепропетровск: Наука и образование, 1998. – 140 с.
6. *Сторчак С. О.* Виготовлення і застосування емульсійних вибухових речовин на кар'єрах / С. О. Сторчак, М. В. Кривцов, В. А. Поплавський. – К.: ЭкспоДата, 2004. – 95 с.
7. *Оценка поражающих факторов* при крупномасштабных взрывах / В. В. Адушкин, Л. М. Перник, В. Н. Костюченко [и др.] // Горный журнал. – 2000. – № 4. – С. 54.
8. *Мионов П. С.* Взрывы и сейсмобезопасность сооружений. – М.: Недра, 1973. – 168 с.
9. *Костюченко В. Н.* Сейсмический эффект при групповых взрывах / В. Н. Костюченко, С. В. Кондратьев, Г. Г. Когарян // Взрыв. дело. – 1983. – № 85/42. – С. 18–31.
10. *Сейсмика промышленных взрывов* / Взрывное дело: под ред. В. Н. Мосинца, В. Ф. Богацкого. – М.: Недра, 1983. – № 45/82. – 256 с.
11. *Мосинец В. Н.* Особенности сейсмического действия взрывов на карьере с мягкими покрывающими породами / В. Н. Мосинец, Э. А. Григорьянц, А. И. Тетерин // Взрыв. дело. – 1983. – № 85/42. – С. 137–150.
12. *Воробьев В. Д.* Учет сейсмоанизотропии пород при взрывной отработке уступов на карьерах / В. Д. Воробьев, В. В. Захаров, И. Н. Ковтун // Разраб. рудн. месторождений. – 1989. – Вып. 47. – С. 32–38.

13. *Цейтлин Я. И.* Об энергетическом критерии опасности действия взрывных волн промышленных взрывов / Я. И. Цейтлин, Р. А. Гильманов // Взрыв. дело. – 1983. – № 85/42. – С. 61–73.
14. *Бойко В. В.* О критериях сейсмической опасности промышленных взрывов / В. В. Бойко, А. А. Кузьменко, Т. В. Хлевнюк // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія «Гірництво»: Зб. наук. праць. – 2005. – Вип. 12. – С. 45–52.
15. *Богацкий В. Ф.* Сейсмическая безопасность при взрывных работах / В. Ф. Богацкий, В. Х. Пергамент. – М.: Недра, 1978. – 128 с.
16. *Крауфорд Ф.* Волны / Пер. с англ., под ред. А. И. Шальникова и А. О. Вайсенберга / Ф. Крауфорд. – М.: Наука, 1976. – 527 с.
17. *Исследование и разработка рациональных методов взрывных работ для обеспечения проектных параметров развала горной массы с сохранением качества дробления и сейсмотехнической безопасности промышленных и гражданских объектов: отчет по НИР (заключительный) / Ин-т геофизики им. С. И. Субботина (ОГВ) АН УССР; рук. В. Д. Воробьев; исп.: А. А. Кузьменко [и др.]. – К., 1989. – 191 с. – № ГР 01.8.80 051824. – Инв. № 028.90 061773.*
18. *Исследование и разработка эффективных и безопасных схем короткозамедленного взрывания на гранитных карьерах: отчет по НИР (заключительный) / Ин-т геофизики им. С. И. Субботина (ОГВ) АН УССР; рук. В. Д. Воробьев; исп.: А. А. Кузьменко [и др.]. – К., 1989. – 121 с. – № ГР 0189.0 077482. – Инв. № 02.9.00 030591.*
19. *Кузьменко А. А.* Распространение сейсмозрывных волн в многослойном горном массиве / А. А. Кузьменко, Т. В. Хлевнюк, О. Н. Чала // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». – 2010. – Вип. 19. – С. 15–20.