

УДК 622.235

Проведение промышленных взрывов вблизи газопроводов

С.В.ХОХЛОВ¹, С.Т.СОКОЛОВ¹, Ю.И.ВИНОГРАДОВ¹, И.Б.ФРЕНКЕЛЬ²

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Инженерный колледж Сами Шамун, Беэр-Шева, Израиль

Как цитировать эту статью: Проведение промышленных взрывов вблизи газопроводов / С.В.Хохлов, С.Т.Соколов, Ю.И.Виноградов, И.Б.Френкель // Записки Горного института. 2021. Т. 247. С. 48-56. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.6

Аннотация. Проблема обеспечения безопасности объектов, которые попадают в зону ведения взрывных работ, обеспечивающих разрушение крепких горных пород, остается актуальной. В статье приводятся результаты крупномасштабного эксперимента по определению безопасных условий ведения буровзрывных работ вблизи действующего газопровода. Наиболее простым и надежным способом обеспечения безопасности охраняемого объекта от сейсмического воздействия является уменьшение интенсивности сейсмовзрывной волны, что достигается путем изменения параметров буровзрывных работ. Для этого необходимы исследования по определению влияния взрывных работ на параметры сейсмовзрывных волн и разработка методик измерения этих параметров. В работе выполнен детальный анализ влияния сейсмовзрывной волны на смещения грунта и модельного газопровода. Показаны особенности проведения сейсмического мониторинга при ведении взрывных работ рядом с действующим газопроводом. Определены коэффициенты сейсмичности и затухания сейсмовзрывных волн. Доказано, что показания сейсмоприемников на поверхности и в глубине массива отличаются в два и более раз.

Ключевые слова: коэффициент сейсмичности; коэффициент затухания; скорость смещения грунта; газопровод; регистрация сигнала; измерительная аппаратура; методика расчета; сейсмовзрывная волна; параметры буровзрывных работ

Введение. После взрыва заряда взрывчатого вещества (ВВ) ударные волны и волны напряжений начинают распространяться через среду в виде упругих волн. Эти волны в упругой зоне известны как сейсмические взрывные волны (СВВ) [12, 22]. Волновое движение распространяется от места взрыва во всех направлениях и уменьшается по мере распространения фиксированной энергии на большую массу материала [25, 35]. Несмотря на то, что интенсивность колебаний грунта экспоненциально убывает с расстоянием, она может оставаться достаточно высокой и наносить значительные повреждения близлежащим конструкциям и сооружениям.

Как правило, строительство дополнительной ветки газопровода производится на расстоянии 15-20 м от действующей магистральной линии [4], что обусловлено снижением капитальных затрат. На участках, где проектируемая траншея прокладывается в скальных грунтах, не существует альтернативы взрывному способу проходки. При проведении буровзрывных работ (БВР) в стесненных условиях возникает риск негативного воздействия на охраняемый трубопровод сейсмовзрывной волной, ударно-воздушными волнами и разлетом кусков взорванной горной массы [13, 23, 29]. Ударно-воздушную волну и разлет осколков на практике минимизируют или стараются исключить полностью [39, 40, 41], используя эффективные способы защиты – различные виды укрытий.

Сейсмическое воздействие взрыва на газопровод, проложенный в скальных породах, уменьшают исключительно изменением параметров БВР, а именно массы единовременно взрываемого заряда, ступени замедления и самого интервала замедления. Поэтому исследования, направленные на определение влияния взрывных работ на параметры сейсмовзрывных волн, являются актуальными [3, 31].

Постановка проблемы. Все исследования, связанные с СВВ, можно разделить на четыре основных направления: исследование влияния СВВ на близлежащие структуры и выявление критериев повреждений; прогнозирование СВВ в точке наблюдения; снижение уровня негативного воздействия СВВ в точке наблюдения; определение влияния различных параметров на уровень СВВ.

Исследование влияния СВВ на близлежащие структуры и выявление критериев повреждений. В последние десятилетия были выявлены, определены и изучены многие критерии повреждений.

Первые исследования по критериям повреждений были проведены в 1927 г. Х.М.Роквеллом и стали известны как формула энергии Роквелла [8]. Х.Николлс [20] обобщил результаты предыдущих изысканий и провел дополнительные исследования по установлению связи между уровнем СВВ и величиной повреждений зданий. Исследовав реакцию конструкций и величину их повреждений в результате воздействия СВВ, Д.Е.Сискинд построил график для оценки возможности безопасного проведения буровзрывных работ, учитывающий пиковую скорость колебания частиц грунта и частоту колебаний, известный как стандарт Бюро горной промышленности США (USBM, упразднено в 1996 г.) [20, 21]. В их публикациях также представлены результаты работ по определению критериев повреждений. В 1983 г. Управление открытых разработок США (OSM) опубликовало нормативные акты по контролю колебаний грунта (инструкция OSM отличается от правил USBM). В 1986 г. опубликованы стандарты безопасности (DIN) для проведения взрывных работ [34]. Стандарты USBM, OSM, DIN применимы только в том случае, если известна пиковая скорость колебания грунта и частота колебаний в точке наблюдения.

Прогнозирование СВВ в точке наблюдения. Некоторые исследователи провели работу по прогнозированию амплитуды СВВ. Эти исследования можно разделить на две группы: моделирование с нормированным расстоянием (НР) [2, 10, 15] и имитационное моделирование [28, 30, 32], включающее метод конечных элементов (МКЭ) и модели искусственных нейронных сетей (ИНС) [19, 27].

НР-моделирование. По мнению большинства исследователей пиковая скорость колебания частиц грунта в СВВ является функцией нормированного расстояния, т.е. соотносит расстояния до взрыва к массе ВВ на ступень замедления. Наиболее широкое применение получило уравнение пиковой скорости колебания частиц, созданное USBM [8]:

$$PPV = K(SD)^{-B}, \quad (1)$$

где SD (Scaled Distance) – нормированное расстояние, м/кг^{1/2}; K – добавочный коэффициент; B – добавочный фактор.

Многие исследователи [28, 36], основываясь на указанных зависимостях, также предложили модифицированные уравнения для прогнозирования пиковой скорости колебания частиц в точке наблюдения. Например, в России аналогом такой зависимости является уравнение пиковой скорости колебания частиц, известное как уравнение М.А.Садовского [6]:

$$V = K_c \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^n, \quad (2)$$

где R – расстояние от центра взрыва до точки измерения, м; Q – максимальная масса взрывчатого вещества в ступени замедления, кг; K_c – добавочный коэффициент, учитывающий горно-геологическое строение массива; n – показатель затухания сейсмических волн с расстоянием.

Предложенные уравнения базируются на статистических зависимостях. Для определения добавочных коэффициентов с помощью множественного регрессионного анализа, должны быть проведены полевые испытания. Опубликовано множество исследований, проведенных с целью определения конкретных коэффициентов для управления СВВ [17, 25, 26, 38].

Моделирование искусственной нейронной сети (ИНС-моделирование). Ряд исследователей пытались предсказать колебания грунта с помощью искусственной нейронной сети, которая включает в себя большое число параметров [7, 22, 33]. Для предсказания PPV и частоты колебания при этом учитывались диаметр, длина и количество скважин, забойка, заряд в ступени замедления, горизонтальные и радиальные расстояния. Авторы утверждают, что модели ИНС обеспечивают лучшее прогнозирование PPV по сравнению с другими методами.

Метод конечных элементов (МКЭ): Некоторые исследователи [18, 37, 39] разработали модель МКЭ для прогнозирования PPV. В своей модели они пытались имитировать факторы, которые оказывают влияние на вибрацию. Таким образом были созданы искусственные колебания для анализа реальных сложных волн.

Снижение уровня негативного воздействия СВВ в точке наблюдения. Чтобы устраниТЬ или уменьшить негативное влияние СВВ в точке наблюдения было проведено огромное количество исследований. Целью одного из направлений исследования было уменьшение СВВ в месте возникновения путем изменения количества, типа ВВ, геометрии взрывных скважин и т.д. Другое

направление было посвящено снижению уровня колебаний в точке наблюдения путем создания искусственно сосредоточенных неоднородностей между очагом взрыва и точкой наблюдения – таких как рассечение грунта, барьер из скважин, траншей. В первой группе для определения добавочных коэффициентов использовалось моделирование нормированного расстояния. После определения добавочных коэффициентов для конкретной области подсчитывалось количество ВВ в ступени замедления, удовлетворяющее условиям безопасного ведения БВР [17, 24, 38].

Исследования с применением при БВР искусственных рассечений, барьеров из скважин, траншей [11, 14] между очагом взрыва и точкой наблюдения показали, что эти искусственные пустоты ведут себя как барьер перед взрывной волной и уменьшают уровень СВВ [9].

Определение влияния различных параметров на уровень СВВ. Интенсивность колебаний грунта зависит от различных параметров. Эти параметры могут быть разделены на контролируемые и неконтролируемые [13, 35]. Контролируемые параметры связаны с проектированием БВР и взрывными характеристиками ВВ. К неконтролируемым параметрам относятся свойства геологических структур и характеристики породы, которые учитываются в дополнительных коэффициентах, и их влияние на *PPV* определено посредством регрессивного анализа.

Обобщенные результаты изучения группы параметров, влияющих на *PPV* [20, 22], показали, что уровни колебания грунта вблизи очага взрыва и в точке наблюдения различаются, *PPV* вблизи очага влияет на *PPV* в точке наблюдения. Эти исследования показали взаимосвязь между параметрами БВР, влияющими на СВВ. Основные зависимости между параметрами колебаний грунта представлены в виде диаграммы отношений [16]. Из диаграммы следует, что основное влияние на колебания грунта вблизи очага взрыва оказывают количество единовременного взрываемого ВВ, линия наименьшего сопротивления (ЛНС) и забойка. Основное влияние на интенсивность в точке наблюдения оказывают *PPV* вблизи очага и геологические структуры, расположенные между очагом и точкой наблюдения. Такие параметры как характеристика породы и расстояние между двумя точками нельзя изменить. Геологические структуры также не могут быть изменены, но искусственные пустоты, созданные на пути продвижения СВВ, могут снизить уровень ее воздействия. В этом случае лучший способ снижения уровня воздействия СВВ в точке наблюдения – уменьшение *PPV* вблизи очага, или создание искусственных пустот между очагом и точкой наблюдения.

Методология. Величина скорости смещения грунта в основании охраняемого объекта является общепринятым критерием оценки сейсмической опасности взрыва. Так в одном из отчетов Бюро горной промышленности США на основании десятилетних исследований приведено следующее: повреждения жилых сооружений от взрывных работ более тесно коррелируют с результатирующей скоростью смещения грунта, нежели с ускорением или смещением.

В РФ критерием безопасности принято считать допустимую векторную скорость или допустимую суммарную скорость по трем составляющим. В США такими критериями являются допустимая векторная и суммарная энергия. Однако количественные параметры и в России, и в США лежат в одном и том же диапазоне значений: для промышленных зданий и сооружений 1-12 см/с (для США допустимой скоростью, при которой обеспечивается безопасный уровень сейсмической энергии, считается 3-12 см/с) [4, 7]. Векторная скорость и энергия вычисляются соответственно:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}; \quad (3)$$

$$W = \sqrt{W_x^2 + W_y^2 + W_z^2}, \quad (4)$$

где x, y, z – соответственно радиальная, тангенциальная и вертикальная составляющая.

При выборе допустимых скоростей в сплошных средах большое значение имеет общая оценка деформационных свойств горных пород. В таких средах сжатие и разгрузка горных пород происходят упруго, т.е. по одному закону без остаточной деформации, при значительном преобладании действующего напряжения над структурной прочностью $\sigma \gg \sigma_s$ сжатие и разгрузка проходят по разным законам с остаточной деформацией. Следовательно, при незначительном преобладании действующего напряжения над структурной прочностью $\sigma_1 > \sigma_s$ в среде могут образовываться остаточные деформации, размер которых зависит от максимального напряжения на фронте волны, действию которого среда подвергается во время прохождения сейсмической волны.

Связь зависимости скорости колебаний грунта от упругопластических свойств горных пород и их относительной деформации [5] описывается формулой:

$$v_0 = \frac{0,375(C_p^2 - \frac{4}{3}C_s^2)((1 + (1 - 2\mu)\epsilon_0)^{\frac{3}{8}} - 1)}{C_p(1 + (1 - 2\mu)\epsilon_0)^4}, \quad (5)$$

где ϵ_0 – относительная деформация; C_s и C_p – скорость продольной и поперечной волны, м/с; μ – коэффициент Пуассона породы.

Допустимые деформации в основании охраняемого объекта определяются классификацией конструкции, сроком службы и важностью объекта [1]. Критическую скорость колебаний можно определить как две допустимые скорости V_0 .

Определение количественных параметров сейсмического действия взрыва при определенных горно-геологических условиях осуществляется на основе решения равенства допустимой скорости и скорости, возникающей в среде при взрыве заряда массой Q на расстоянии R от конструкции [6], согласно формуле (2).

Скорость сейсмических колебаний при определенных горно-геологических условиях можно определить экспериментально, с применением специальных сейсмических исследований. Расчеты по определению скорости смещения можно провести по зависимости:

$$v = 10^4 \cdot 7,5 \sqrt{\frac{q}{C_p \rho t}} \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^n. \quad (6)$$

Допустимые скорости смещения определены для большинства конструкций и типов горных пород [6]. В случае трубопроводов эти смещения посредством расчетных методов можно оценить только приблизительно.

Определенная таким образом допустимая скорость смещения у основания трубопровода не дает точных значений возникающей сейсмовзрывной волны. Это связано с различными факторами, влияющими на характер распространения сейсмических колебаний. В связи с этим возникает необходимость в постоянном отслеживании параметров сейсмовзрывной волны (скорости, ускорения и смещения) в горной породе с помощью инструментальных методов. Сейсмический мониторинг вблизи особо охраняемого объекта проводится уже после определения параметров среды (коэффициентов сейсмичности и затухания). Необходимость такого рода мониторинга обусловлена возможным нарушением технологии ведения взрывных работ: нарушением схемы монтажа взрывной сети, завышением массы заряда на ступень замедления, занижением установленных интервалов между ступенями замедления.

При проведении подобного мониторинга подземных трубопроводов существуют особенности, которые необходимо учитывать при разработке методики измерений. Исследования, изложенные в статье, посвящены выявлению и учету этих характеристик.

Методика исследования. Для вычисления коэффициента затухания n , который определяет параметры затухания скорости смещения грунта в сейсмовзрывной волне, и определения параметров сейсмовзрывной волны, пришедшей непосредственно на стенки газопровода, был поставлен полномасштабный эксперимент. Созданный модельный газопровод в ходе экспериментальных взрывов, проводимых в непосредственной близости, принимал на себя сейсмические волны.

Основная цель эксперимента заключалась в получении данных о затухании колебаний грунта в СВВ с расстоянием и определении поправочного коэффициента для мониторинга БВР с поверхностным размещением датчика.

Модель представляла собой отрезок трубопровода длиной 11,6, диаметром 1,22 м, массой 6,2 т и толщиной стенки 17,8 мм, материал исполнения – сталь класса прочности К60. Данный отрезок укладывали в траншею, точно повторяющую параметры траншеи под магистральный трубопровод и отвечающую всем требованиям действующих норм и стандартов, применяемых при строительстве подземных газопроводов. Одна сторона модельной траншеи была выбрана в зоне сильно трещиноватых гранитов, перекрывающих практически монолитные граниты. Другая сторона траншеи была создана путем отсыпки песка и супеси для обеспечения преимущественного распространения сейсмических взрывных волн вдоль границы монолитных гранитов (рис.1, а).

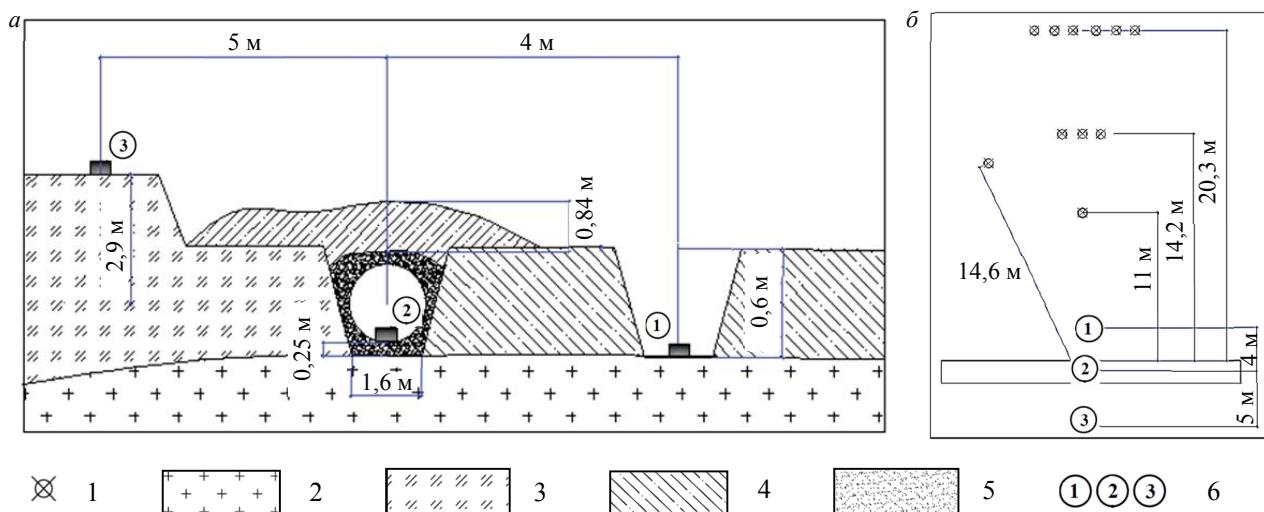


Рис.1. Схемы укладки модельного газопровода (а) и расположения датчиков относительно трубы (б)
1 – скважина; 2 – монолитные граниты; 3 – трещиноватые граниты; 4 – песок, супесь; 5 – отсев (песчаная подушка);
6 – точки измерения (перед трубой, в трубе, за трубой)

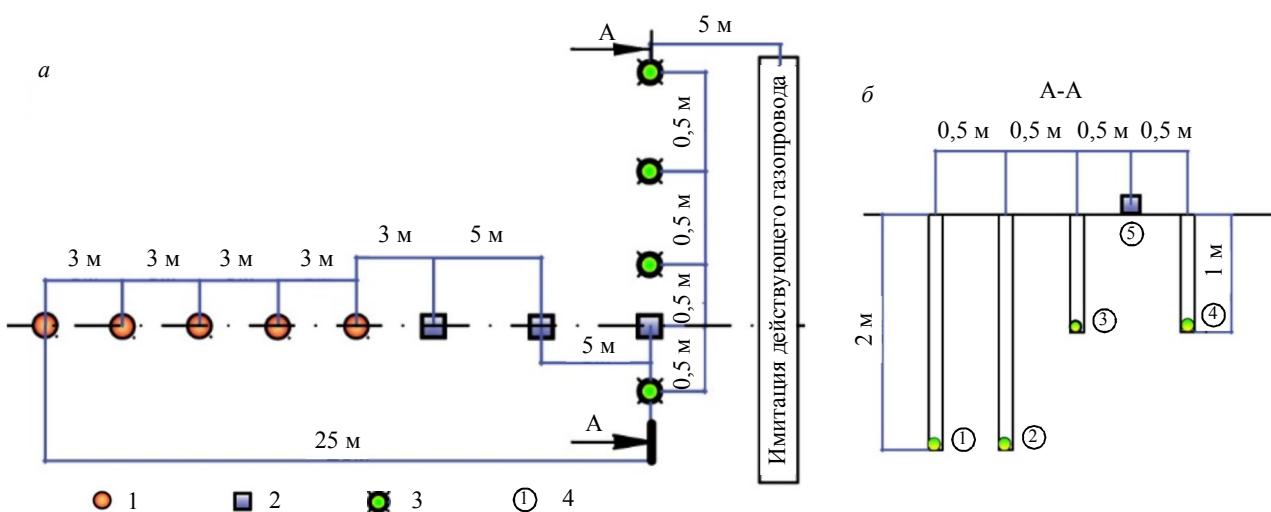


Рис.2. Схемы проведения экспериментального исследования (а) и установки углубленных датчиков (б)
1 – взрывная скважина: глубина 2 м, масса заряда 1 кг, ВВ – Нитронит ПАС-60, укрытие – песок Н-1,5 м; 2 – поверхностные датчики;
3 – глубинные датчики; 4 – номер датчика



Рис.3. Процесс установки датчиков: создание траншеи для установки поверхностных датчиков на взываемый
массив (а); бурение скважин под установку углубленных датчиков (б); установка датчиков (в)

Скважинные заряды располагались на расстоянии от модельной трубы в соответствии со схемой, представленной на рис.1, б.

В схожих горно-геологических условиях в ходе реконструкции Северо-Европейского газопровода проводился второй эксперимент, направленный на определение коэффициента сейсмичности и коэффициента затухания, а также определение корреляционной зависимости амплитудных параметров сейсмовзрывной волны от глубины регистрации сигнала. С этой целью было организовано пять взрывов одиночных зарядов ВВ массой 1 кг, расстояние между взываемыми скважинами составляло 3 м, максимальное расстояние до датчиков – 25, минимальное – 13 м (рис.2). Процесс подготовки эксперимента показан на рис.3.

Для измерений использовались регистрационные приборы Blastmate III и Minimate Plus, а также сейсмостанция Zet 048-C № 2156, в измерительные скважины опускались однокомпонентные пьезодатчики.

Полученные в ходе мониторинга строительства Северо-Европейского газопровода в Выборгском районе Ленинградской области приблизительные значения коэффициента сейсмичности $K_c = 546$ и коэффициента затухания $n = 2,4$ были проверены и пересчитаны для условий настоящего строительства.

Результаты. Результаты измерения скоростей смещения в ходе первого эксперимента из трех точек регистрации (T1, T2, T3) от четырех взрывов приведены в табл.1.

Коэффициент затухания сейсмовзрывной волны для данных горно-геологических условий был рассчитан по экспериментальным результатам (табл.1).

Анализ результатов показал, что значение вектора полной скорости на поверхности (T1) как минимум в три раза выше скорости в трубе (T2).

Исходя из того, что во время первого взрыва распространение СВВ происходило в неповрежденной породе, и значение коэффициента затухания было минимальным, для оценки сейсмических воздействий на заглубленный объект, результаты замеров воздействия СВВ, полученные с наземным размещением датчиков, необходимо уменьшить в три раза.

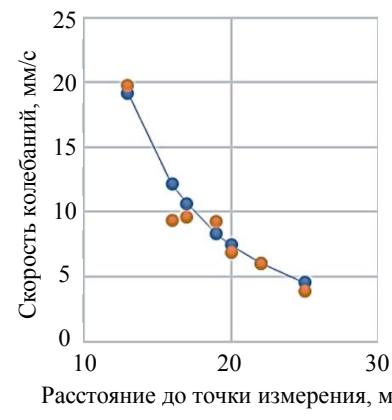


Рис.4. Распределение скорости колебаний

1 – расчетное значение скорости сейсмических колебаний с применением значений коэффициентов сейсмичности $K = 546$ и затухания $n = 2,2$; 2 – экспериментальные значения скорости сейсмических колебаний

Таблица 1

Распределение скоростей смещения

Номер взрыва	Общая масса ВВ, кг	T1 (перед трубой)			T2 (в трубе)			T3 (за трубой)		
		$v_{расч}$, см/с	$v_{изм}$, см/с	R, м	$v_{расч}$, см/с	$v_{изм}$, см/с	R, м	$v_{расч}$, см/с	$v_{изм}$, см/с	R, м
1	86,4	8,15	2,21	15,9	4,23	4,05	20,9	2,07	2,94	24,9
2	14,4	17,5	1,83	10,2	6,72	6,02	15,2	3,83	4,61	19,2
3	32,5	37,0	3,64	9,8	13,7	9,97	14,8	7,73	6,32	18,8
4	14,4	49,8	>25,4	6,6	12,9	4,90	11,6	6,31	2,67	15,6

Примечания: $v_{расч}$ – расчетное значение скорости смещения грунта, вычисленное по формуле (2); $v_{изм}$ – измеренное значение скорости смещения грунта; R – расстояние от датчика до соответствующего взрыва.

Анализ результатов второго эксперимента (рис.4.) показал хорошую сходимость экспериментальных и расчетных данных при значениях коэффициентов затухания и сейсмичности 2,2 и 542 соответственно (табл.2).

Измерение колебательного ускорения частиц горного массива в зависимости от глубины расположения датчиков (см. рис.2, б) показало, что значение понижающего коэффициента для ускорений, зарегистрированных на поверхности, меняется от 2 до 4 (табл.3).

Таблица 2

Распределение скоростей

Расстояние до датчика, м	Скорость колебаний, мм/с		Погрешность, %
	экспериментальная	расчетная	
13	19,8	19,20	3
16	9,39	12,16	22
17	9,6	10,64	10
19	9,3	8,33	10
20	6,9	7,44	7
22	6	6,03	1
25	3,9	4,56	14

Таблица 3

Распределение ускорений колебания частиц массива

Номер датчика	Глубина, м	Значение ускорения, г
1	2	0,12
2	2	0,13
3	1	0,22
4	1	0,26
5	0	0,49

Обсуждения. Результаты измерений на ненарушенном гранитном массиве и в трубе совпадают с результатами вычислений, выполненных по формуле (2), которая является расчетной для обеспечения сейсмобезопасности в проекте буровзрывных работ на строительстве 2-й нитки Северо-Европейского газопровода (табл.1, Т2, Т3).

Результаты измерений на нарушенном гранитном массиве резко отличаются в меньшую сторону (примерно на порядок) от расчетных значений (табл.1, Т1).

Совпадение расчетных и замеренных значений скоростей в трубе и на гранитном массиве объясняется тем, что стальная труба массой 6,2 т была положена на песчаную подушку толщиной 250 мм, которая, в свою очередь, была уложена на ненарушенный массив горных пород. Можно предположить, что стальная труба продавила песчаную подушку, за счет чего создался контакт стали с гранитным массивом. Аналогичная ситуация чрезвычайно редко может возникнуть при строительстве газопровода, так как песчаная подушка будет обязательно располагаться на нарушенном гранитном массиве после взрывов, которые используются для строительства траншеи. Таким образом, сейсмовзрывные волны, которые подходят к действующей нитке газопровода, будут затухать примерно так же, как это было зафиксировано в точке измерений Т1. Это объясняется тем, что вокруг построенной при помощи взрывов траншеи образуется достаточно мощный слой разрушенного массива выветренных горных пород.

Результаты позволяют предположить, что замеренные параметры сейсмовзрывных волн в процессе мониторинга непосредственно у действующего трубопровода будут некорректными, не отражающими истинные их значения на стенке трубы. Поэтому измерения при мониторинге параметров сейсмовзрывных волн необходимо проводить на расстоянии не ближе 5 м от оси действующего газопровода в сторону взрыва.

Исходя из измеренных значений скоростей смещения грунта при проведении мониторинга, следует принять предельно допустимую скорость смещения грунта, равную 20 см/с, рассчитанную по методике, в основу которой положен предел прочности трубы на растяжение. Поэтому на расстоянии в 10 м от места проведения взрыва скорость смещения, регистрируемая на поверхности, не должна превышать 40 см/с. Исходя из этого, соотношение между измеряемой поверхностью скоростью смещения и скоростью смещения грунта в месте заложения трубы охраняемого газопровода следует принять равным двум.

Выводы. Создана физическая модель существующего газопровода: отрезок стальной трубы размещен в траншее стандартных размеров, пройденной в скальной породе, таким образом были смоделированы реальные условия прокладки трубопроводов. Моделирование взрывного нагружения

экспериментальной трубы велось в условиях полигона, отвечающего по своим горно-геологическим условиям характеристикам условий прокладки строящегося газопровода и обеспечивающего наиболее жесткое сейсмическое воздействие на трубу.

Измерены параметры СВВ в трех точках: перед трубой, в трубе, за трубой. Дополнительно для уточнения и апробации результатов модельного эксперимента при реконструкции газопровода был проведен промышленный эксперимент в реальных условиях. Были измерены параметры СВВ на различном расстоянии от места взрыва. Одновременно с этим измерялись параметры СВВ на поверхности, на глубине 1 и 2 м. Были получены данные о затухании колебаний грунта с расстоянием и определены поправочные коэффициенты для определения параметров СВВ на глубинах 1 и 2 м по измеренным значениям этих параметров, полученным на поверхности.

Анализ результатов сейсмического воздействия взрывов на углубленные объекты позволяет сделать следующие выводы:

- установка сейсмических датчиков должна осуществляться на расстоянии не ближе 5 м от объекта;
- скорость (ускорение) колебаний грунта на глубине 2 м в три раза меньше, чем скорость (ускорение) колебаний грунта на поверхности;
- коэффициенты сейсмичности и затухания должны определяться экспериментально по данным предварительно проведенных взрывов.

Проведенный по данной методике сейсмический мониторинг массивных взрывов при ведении взрывных работ в непосредственной близости от углубленных газопроводов гарантирует соблюдение условий, обеспечивающих безопасность этих объектов от сейсмического воздействия взрыва.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богацкий В.Ф. Сейсмическая безопасность при взрывных работах / В.Ф.Богацкий, В.Х.Пергамент. М.: Недра, 1990. 228 с.
2. Господариков А.П. Математическое моделирование воздействия сейсмовзрывных волн на горный массив, включающий выработку / А.П.Господариков, Я.Н.Выходцев, М.З.Засцепин // Записки Горного института. 2017. Т. 226. С. 405-411. DOI: 10.25515/PMI.2017.4.405
3. Котиков Д.А. Установление связи между распределением сейсмособытий в массиве горных пород и его тектоническим строением / Д.А.Котиков, А.Н.Шабаров, С.В.Цирель // Горный журнал. 2020. Т.1. С. 28-32. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.05
4. Матааш С.Л. Обеспечение безопасности действующих газопроводов, при строительстве вблизи траншей в скальных грунтах буровзрывным способом для новых магистралей // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. Т. 12. С. 186-193.
5. Мосинец В.Н. Разрушение трещиноватых и нарушенных горных пород / В.Н.Мосинец, А.В.Абрамов. М.: Недра, 1982. 248 с.
6. Садовский М.А. Простейшие приемы определения сейсмической опасности при взрывах. М.: Изд-во Института горного дела АН СССР, 1946. 29 с.
7. Сейсмическое воздействие взрыва на инженерные сооружения и массив горных пород / М.К.Егизбаев, В.Л.Выходцев, В.А.Артемов и др. // Записки Горного института. 2007. Т. 171. С. 185-188.
8. Abbaszadeh Shahri A. Optimized developed artificial neural network based models to predict the blast-induced ground vibration / A.Abbaszadeh Shahri, R.Asheghi // Innovative Infrastructure Solutions. 2018. Vol. 3. 10 p. DOI: 10.1007/s41062-018-0137-4
9. Adam M. Reduction of train-induced building vibrations by using open and filled trenches / M.Adam, O.Estorff // Computers and Structures. 2005. Vol. 83. Iss. 1. P. 11-24. DOI: 10.1016/j.compstruc.2004.08.010
10. Adhikari G.R. Control measures for ground vibration induced by blasting at coal mines and assessment of damage to surface structures / G.R.Adhikari, N.K.Jain, S.Roy // Journal of Rock Mechanics and Tunneling Technology. 2006. Vol. 12. № 1. P. 3-19.
11. Alzawi A. Experimental investigations on vibration isolation using open and GeoFoam wave barriers: comparative study / A.Alzawi, M.Hesham El Naggar // Proceedings of the 63rd Canadian geotechnical conference, 2010, Calgary, AB, Canada. Geo, 2010. P. 360-368.
12. Application of simulated annealing for optimization of blasting costs due to air overpressure constraints in open-pit mines / H.B.Ammieh, M.H.Bidgoli, H.Mokhtari, A.Bazzazi // Journal of Mining and Environment. 2019. Vol. 10. Iss. 4. P. 903-916. DOI: 10.22044/jme.2019.8084.1675
13. Azimi Y. Prediction of Seismic Wave Intensity Generated by Bench Blasting Using Intelligence Committee Machines // International Journal of Engineering. Transactions A: Basics. 2019. Vol. 32. Iss. 4. P. 617-627. DOI: 10.5829/ije.2019.32.04a.21
14. Barrier holes and trench application to reduce blast induced vibration in Seyitomer coal mine / K.Erarslan, Ö.Uysal, E.Arpaç, M.A.Cebi // Environmental Geology. 2008. Vol. 54. Iss. 6. P. 1325-1331. DOI: 10.1007/s00254-007-0915-3
15. Effect of artificial discontinuities on blast induced vibrations in open pit mines / Ö.Uysal, E.Arpaç, M.Cavus et al. // Harmonizing Rock Engineering and the Environment. Proceedings of the 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics, 16-21 October, 2011, Beijing, China. One Petro, 2012. P. 1281-1284. DOI: 10.1201/b11646-240
16. Elevli B. Evaluation of parameters affected on the blast induced ground vibration (BIGV) by using relation diagram method (RDM) / B.Elevli, E.Arpaç // Acta Montanistica Slovaca. 2010. Vol. 15. Iss. 4. P. 261-268.
17. Evolution of effective charge weight per delay for prediction of ground vibrations generated from blasting in a limestone mine / P.K.Singh, A.Sirveiya, K.Babu et al. // International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment. 2006. Vol. 20. Iss. 1. P. 4-19. DOI: 10.1080/13895260500286050

18. FEM models including randomness and its application to the blasting vibrations prediction / J.Torano, R.Rodriguez, L.Diego et al. // Computers and Geotechnics. 2006. Vol. 33. Iss. 1. P. 15-28. DOI: 10.1016/j.compgeo.2006.01.003
19. Grishchenkova E.N. Development of a Neural Network for Earth Surface Deformation Prediction // Geotechnical and Geological Engineering. 2018. Vol. 36. Iss. 4. P. 1953-1957. DOI: 10.1007/s10706-017-0438-y
20. Heath D.J. Blast Vibration and Environmental Loads Acting on Residential Structures: State-of-The-Art Review / D.J.Heath, E.F.Gad, J.L.Wilson // Journal of Performance of Constructed Facilities. 2016. Vol. 30. Iss. 2. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000750
21. Hudaverdi T. An alternative approach to predict human response to blast induced ground vibration / T.Hudaverdi, O.Akyildiz // Earthquake Engineering and Engineering Vibration. 2021. Vol. 20. P. 257-273. DOI: 10.1007/s11803-021-2018-7
22. Influence of initiation mode of explosives in opencast blasting on ground vibration / M.P.Roy, P.K.Singh, G.Singh, M.Monjezi // Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology. 2007. Vol. 116. Iss. 1. P. 1-6. DOI: 10.1179/174328607X161888
23. Isheyskiy V. Combination of fracturing areas after blasting column charges during destruction of rocks / V.Isheyskiy, M.Marinin, V.Dolzhikov // International Journal of Engineering Research and Technology. 2019. Vol. 12(12). P. 2953-2956.
24. Kahriman A. Analysis of parameters of ground vibration produced from bench blasting at a limestone quarry // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2004. Vol. 24. Iss. 11. P. 887-892. DOI: 10.1016/j.soildyn.2004.06.018
25. Khandelwal M. Blast-induced ground vibration prediction using support vector machine // Engineering with Computers. 2011. Vol. 27. Iss. 3. P. 193-200. DOI: 10.1007/s00366-010-0190-x
26. Khandelwal M. Evaluation of Blast-Induces Vibration Predictors / M.Khandelwal, T.H.Singh // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2007. Vol. 27. Iss. 2. P. 116-125. DOI: 10.1016/j.soildyn.2006.06.004
27. Khandelwal M. Prediction of blast induced ground vibrations and frequency in opencast mine: A neural network approach / M.Khandelwal, T.N.Singh // Journal of Sound and Vibration. 2006. Vol. 289. Iss. 4-5. P. 711-725. DOI: 10.1016/j.jsv.2005.02.044
28. Khandelwal M. Evaluation and prediction of blast induced ground vibration using support vector machine / M.Khandelwal, P.K.Kankar, S.P.Harsha // Mining Science and Technology. 2010. Vol. 20. Iss. 1. P. 64-70. DOI: 10.1016/S1674-5264(09)60162
29. Kholodilov A.N. Modeling Seismic Vibrations under Massive Blasting in Underground Mines / A.N.Kholodilov, A.P.Gospodarikov // Journal of Mining Science. 2020. Vol. 56. Iss. 1. P. 29-35. DOI: 10.1134/S1062739120016454
30. Kiehl J.R. Measurement and analyses of blasting vibrations / J.R.Kiehl, J.Werfling // Proceedings of the 10th ISRM Congress, 8-12 September, 2003, Sandton, South Africa. OnePetro, 2003. P. 635-640.
31. Kotikov D.A. Dependence of the distribution of seismic events on the location of geological faults / D.A.Kotikov, S.V.Tsirel // Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure Development. Proceedings of the 14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering (ISRM, 2019), 13-18 September, 2019, Foz Do Igvassu, Brazil. Taylor & Francis Group pic Typeset by Integra Software Services Pvt. Ltd., 2020. P. 1448-1455.
32. Koteleva N. Digital Processing of Seismic Data from Open-Pit Mining Blasts / N. Koteleva, I. Frenkel // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Iss. 1. P. 383. DOI: 10.3390/app11010383
33. Kuzi C. The importance of site-specific characters in prediction models for blast-induced ground vibrations // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2008. Vol. 28. Iss. 5. P. 405-414. DOI: 10.1016/j.soildyn.2007.06.013
34. Prakash A.J. Analysis of blast vibration characteristics across a trench and a pre-split plane / A.J.Prakash, P.Palroy, D.D.Misra // Fragblast. 2004. Vol. 8. Iss. 1. P. 51-60. DOI: 10.1080/13855140512331389634
35. Singh T.N. An Intelligent Approach to Prediction and Control Ground vibrations in mines / T.N.Singh, V.Singh // Geotechnical and Geological Engineering. 2004. Vol. 23. P. 249-262. DOI: 10.1007/s10706-004-7068-x
36. The process of destruction of rock by an explosion with the use of blasthole stemming in roadheading mining operation / F.T.Khudoyerberdiev, Y.T.Nurboboev, S.F.Maksudov, S.M.Shomurodov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 14-16 October, 2020, Tashkent, Uzbekistan. IOP, 2020. Vol. 614. P. 012067. DOI: 10.1088/1755-1315/614/1/012067
37. Torano J. Simulation of the vibrations produced during the rock excavation by different methods / J.Torano, R.Rodriguez // WIT Transactions on Modelling and Simulation. 2003. Vol. 33. 8 p.
38. Uysal O. Environmentally sensitive drilling and blasting design for a surface mining / O.Uysal, B.Elevli, H.Akcakoca // Mine Planning and Equipment. Proceedings of the 13th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, 1-3 September, 2004, Wroclaw, Polland. CRC Press, 2004. P. 329-331.
39. Vasilets V.V. Safe operation of mining-and-transport system under impact of seismic shot waves / V.V.Vasilets, P.I.Afanasev, A.A.Pavlovich // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2020. Vol. 1. P. 26-35. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-26-35
40. Yastrebova K.N. Solving the issue of ventilating atmosphere of opencast mining by resloping bench face / K.N.Yastrebova, V.I.Chernobay, D.V.Moldovan // International Journal of Advanced Science and Technology. 2020. Vol. 29(1). P. 1-6.
41. Yastrebova K.N. Influence of the nature of the outflow of explosion products from blast holes and boreholes on the efficiency of rock destruction / K.N.Yastrebova, V.I.Chernobay, D.V.Moldovan // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 174. 01017. DOI: 10.1051/e3sconf/202017401017

Авторы: С.В.Хохлов, канд. техн. наук, доцент, khokhlov_sv@pers.spmi.ru, https://orcid.org/0000-0003-10408-328 (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), С.Т.Соколов, аспирант, setka1993@yandex.ru, https://orcid.org/ 0000-0003-3153-7874 (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), Ю.И.Виноградов, канд. техн. наук, доцент, vinogradov_yui@pers.spmi.ru, https://orcid.org/ 0000-0001-9468-2214 (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), И.Б.Френкель, PhD, старший преподаватель, iliasf@frenkel-online.com, https://orcid.org/0000-0002-2701-5726 (Инженерный колледж Сами Шамун, Беэр-Шева, Израиль).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 25.01.2021.

Статья принята к публикации 01.02.2021.