

УДК 622.235.535.2:621.643.02

Жариков Сергей Николаевич

кандидат технических наук,
заведующий лабораторией,
Институт горного дела УрО РАН,
620075 Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: 333vista@mail.ru

Берсенёв Геннадий Порфирьевич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Институт горного дела УрО РАН

Кутуев Вячеслав Александрович

научный сотрудник,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: slavik1988@mail.ru

Флягин Александр Сергеевич

младший научный сотрудник,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: flyagingdr@mail.ru

**НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
СЕЙСМИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ
ВЗРЫВА НА ПОДЗЕМНЫЙ ГАЗОПРОВОД
ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ***

Аннотация:

Научная актуальность исследования сейсмического действия взрыва определяется неоднородностью реального горного массива и соответствующей сложной предсказуемостью распространения колебаний в том или ином направлении на различные расстояния. Фактор значительной неопределенности начальных условий распространения и ограничения в средствах наблюдения за процессом не позволяют перевести эти работы из научных в разряд изысканий, которые могли бы быть регламентированы государственным стандартом. Поэтому, когда возникает вопрос безопасного производства взрывных работ вблизи особо охраняемого объекта, всегда целесообразным является проведение соответствующей научной работы. В статье представлены результаты исследования допустимой динамической нагрузки на площадку прокладки газопровода высокого давления II категории, размещенного в границах горного отвода, в связи с производством взрывных работ на карьере ОАО «Сухоложскцемент». Работа направлена на повышение уровня безопасной эксплуатации газопровода и установление ограничений по сейсмическому воздействию горных (взрывных) работ в направлении места прокладки газопровода. Применена методика ИГД УрО РАН для определения допустимых расстояний от технологического взрыва в карьере до

DOI: 10.25635/2313-1586.2019.03.145

Zharikov Sergey N.

Candidate of Technical Sciences,
Head of Laboratory,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg, 58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: 333vista@mail.ru;

Bersenyov Gennady P.

Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS

Kutuev Vyacheslav A.

Researcher,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: slavik1988@mail.ru;

Flyagin Aleksandr S.

Junior Researcher,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: flyagingdr@mail.ru;

**SCIENTIFIC RESEARCH ON
SEISMIC EFFECT OF EXPLOSION
AT UNDERGROUND GAS PIPELINE
OF HIGH PRESSURE**

Abstract:

The scientific relevance of the study on seismic effect of the explosion is determined by the heterogeneity of the real mountain mass and the corresponding difficult predictability of the propagation of vibrations in one direction or in another at different distances. The significant uncertainty of the initial conditions of distribution and limitations in the means of monitoring the process do not allow transferring these works from scientific to the category of research regulated by the state standard. Therefore, when there is a question of safe execution of explosive works near especially protected object, it is always rational to carry out the corresponding scientific work. The article presents the results of the study of the permissible dynamic load on the area of the high-pressure gas pipeline of the II category, located within the boundaries of the mining branch, in connection with the blasting works at the quarry of JSC "Sukholozhsktsement". The work aims improving the level of safety of operation the gas pipeline and establishing the restrictions on the seismic effects of mining (blasting) works in the direction of the gas pipeline installation. The technique of IM UB RAS is applied to determine the permissible distances from the technological explosion in the quarry up to the protected object (gas pipeline), depending on the mass of explosives in the deceleration stage, the coefficient of soil conditions and the permissible speed of seismic oscillations. We note that depending on the depth of the explosion in the

* Исследования выполнены в рамках Государственного задания № 075-00581-19-00, тема № 0405-2019-0005, а также при дополнительном привлечении хозяйственных средств

охраняемого объекта (газопровода) в зависимости от массы ВВ в ступени замедления, коэффициента грунтовых условий и допустимой скорости сейсмических колебаний. Установлено, что в зависимости от глубины взрыва в карьере путем изменения массы в ступени замедления возможно полностью исключить негативное влияние взрыва на район укладки газопровода. Также предложена расчетная схема для определения безопасных расстояний до газопровода высокого давления в зависимости от угла борта и глубины проведения взрывных работ в карьере. Выполнен динамический расчетный анализ силового воздействия от взрывных работ на грунты и газопровод высокого давления. Рекомендовано установить ограничения по массе ВВ на уровне минимальных опасных значений, а для предстоящих взрывов проектировать схему иницирования зарядов с массой ВВ менее 1(одной) т в ступени замедления.

Ключевые слова: сейсмическое действие взрыва, сейсмоустойчивость, взрывные работы, разрушение горных пород, физико-механические свойства горных пород, газопровод высокого давления, безопасные расстояния

quarry and the corresponding geological data, by changing the mass in the deceleration stage, it is possible to eliminate completely the negative impact of the explosion on the area of laying the gas pipeline. A calculation scheme also propose to determine the safe distances to the high-pressure gas pipeline depending on the angle of the board and the depth of blasting in the quarry. We have performed the dynamic calculation analysis of the force impact of blasting on soils or rocks and high-pressure gas pipeline. It is recommended to establish restrictions on the mass of explosives at the level of minimum dangerous values, and, for the upcoming explosions, to design a scheme of initiation of charges with a mass of explosives, in the deceleration stage, less than 1(one) ton

Key words: seismic effect of the explosion, seismic stability, blasting works, destruction of rocks, physical and mechanical properties of rocks, high-pressure gas pipeline, safe distance

Введение

Проблематика исследования заключается в том, что газопровод высокого давления (свыше 0,3 до 0,6 МПа) II категории размещен вблизи горного отвода ОАО «Сухоложскцемент». Требуется обеспечить сейсмическую безопасность эксплуатации газопровода и определить допустимые расстояния подхода взрывных и горных работ в целом, а также допустимую сейсмоустойчивость площадки размещения.

В рамках исследования необходимо было решить две поставленные задачи:

- определить допустимые скорости сейсмических колебаний и перемещений грунта в зоне прокладки газопровода высокого давления II категории диаметром 225 мм, при которых сохраняется безопасная эксплуатация;
- определить безопасное расстояние (зону, величину откоса) от газопровода, в которой запрещена сейсмическая активность выше 6 и 7 баллов ввиду геологических особенностей.

В административном отношении трасса газопровода проходит от южной границы г. Сухой Лог, вдоль автомобильной дороги г. Сухой Лог – г. Камышлов, до п. Курьи.

В геоморфологическом отношении газопровод находится на слегка увалистой платообразной равнине восточного склона Среднего Урала в 0,5 – 3,6 км от р. Пышма. Склоны долины реки осложнены эрозионно-карстовыми логами. Естественный рельеф трассы относительно ровный, с уклоном к северо-востоку в сторону р. Пышма. Абсолютные отметки поверхности изменяются в пределах 145 – 166 м. Перепад существующих высотных отметок земли на данном участке составляет 21 м.

Участок трубопровода расположен в зоне развития каменноугольных известняков мелкозернистых, массивных, серых, буро-серых, редко темных брекчиевидных известняков.

По данным бурения и анализа результатов лабораторных проб в геолого-литологическом разрезе площадки проектируемого строительства выделено 5 инженерно-геологических элементов (ИГЭ). Ниже приводится описание разреза по выделенным ИГЭ (сверху-вниз):

• ИГЭ – 1 Насыпной грунт (tQ) представлен щебнем отсыпки автодорог, суглинком и супесью со щебнем с примесью строительного мусора и почвенно-растительного грунта. Мощность насыпного грунта по скважинам составляет 1,0 – 1,5 м. Использовать в основании фундаментов сооружений не рекомендуется.

• ИГЭ – 2 Суглинок делювиальный твердый (dQ) – коричневого, темно-коричневого цвета, с редкой галькой кварца, местами с белыми карбонатными стяжениями. Вскрытая мощность слоя 1,4 – 4,8 м. По степени морозоопасности делювиальные грунты оцениваются как слабопучинистые. Тип грунтовых условий по просадочности – I.

• ИГЭ – 3 Супесь аллювиальная твердая (aQ) – ярко-охристого цвета, песчанистая, с гравием кварца до 23,0 %, местами гравелистая. Вскрытая мощность слоя 0,3 – 2,3 м. По степени морозоопасности аллювиальные грунты оцениваются как практически непучинистые. По предварительной оценке грунты слоя просадочные. Тип грунтовых условий по просадочности – I. По предварительной оценке супесь аллювиальная относится к ненабухающим грунтам.

• ИГЭ – 4 Суглинок континентальный твердый ($K2cm$) – серого, коричнево-серого, желто-серого цвета, с желтыми пятнами, легкий и тяжелый, пылеватый, преимущественно твердый, в единичных случаях полутвердый. Местами с ржавыми охристыми пятнами и редким щебнем. Мощность слоя 0,5 – 5,5 м. По степени морозоопасности делювиальные грунты оцениваются как слабопучинистые. По предварительной оценке грунты слоя непросадочные, ненабухающие.

• ИГЭ – 5 Скальный грунт прочный (Pz) – известняк серого, буро-серого цвета, мелкозернистый, массивный, местами брекчиевидный, сильнотрещиноватый, очень плотный. Хорошо вскипает от действия HCl. По трещинам налет гидроокислов железа, с участками ожелезнения по массе, местами с многочисленными разноориентированными тонкими (0,5 – 0,7 мм) прожилками кальцита. Керн в виде крупного щебня, обуренных фрагментов и столбиков до 10 см. Выход керна 40 – 60 %.

Территория г. Сухой Лог и прилегающие территории относятся к району с сейсмической интенсивностью 6 баллов по шкале MSK-64. Грунты относятся к I и II категории по сейсмическим свойствам.

Методика исследований скорости сейсмических колебаний

Динамика воздействия от взрывных работ проявляется в сейсмических колебаниях грунта. Допустимое сейсмическое воздействие при массовых взрывах определяется в двух направлениях. Во-первых, воздействие сейсмических колебаний от взрывных работ не должно привести к потере устойчивости массива в границах площадки объекта. Во-вторых, колебания грунта под сооружением (газопроводом высокого давления) не должны привести к его разрушению. Для выполнения комплекса расчета сейсмоустойчивости грунтов на площадках объектов и определения допустимых значений скорости колебаний для газопровода высокого давления в границах горного отвода карьера ОАО «Сухоложскцемент», использованы разработки ИГД УрО РАН [1 – 6].

Допустимое значение скорости сейсмических колебаний находится в соответствии с допустимым динамическим напряжением в массиве. Допустимая величина напряжений характеризует сейсмоустойчивость выработки (1):

$$[\sigma_{ст}] + [\sigma_{дин}] \leq \sigma_{доп}, \quad (1)$$

где $[\sigma_{ст}]$ – статическое напряжение в массиве, окружающем выработку, МПа; $[\sigma_{дин}]$ – динамическое напряжение в массиве (около выработки), МПа; $\sigma_{доп}$ – допустимая величина напряжений, МПа.

Все последующие расчеты подразумевают, что условие выражения (1) соблюдается и исследуемый массив горных пород устойчив. В приближении за допустимую величину напряжений ($\sigma_{доп}$) можно принимать статический предел прочности пород на рас-

тяжение в массиве (σ_p), увеличенный на 10 – 30 % [5]. Следует отметить, что σ_p , определенное в образце, существенно отличается от значения в массиве ввиду макронарушений. В массиве σ_p меньше, чем в образце в 5 – 10 и более раз [5], т.к. породы, как правило, перемешаны между собой, также на эту величину существенно влияет трещиноватость и материал заполнения пустот. Определение прочности массива на растяжение осуществляется с помощью коэффициента структурного ослабления. Однако данный коэффициент, ввиду масштабного эффекта, в настоящее время можно определить только экспериментально, при этом на разных участках массива в одной породе он может существенно отличаться. Учитывая, что способы определения реального состояния массива пока находятся в развитии и требуют дополнительных исследований, то для приближенных расчетов прочность пород в массиве скальных пород можно принять $0,1\sigma_p$ от значения в образце.

Согласно [3, 5] допустимая скорость смещения массива может быть определена по выражению

$$v_d = \frac{2\sigma_{\text{доп}}}{\gamma C} 981 \cdot 10^3, \text{ см/с}, \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{доп}}$ – допустимая величина напряжений, кгс/см²; γ – плотность пород, т/м³; C – скорость звука в породе, см/с.

Придерживаясь значений показателей согласно системе СИ, выражение (2) можно записать в следующей форме:

$$v_d = \frac{\sigma_{\text{доп}}}{\gamma C} 2604,1, \text{ м/с}, \quad (3)$$

где $\sigma_{\text{доп}}$ – допустимая величина напряжений, МПа; γ – плотность пород, т/м³; C – скорость звука в породе, м/с.

Скорость сейсмических колебаний в зависимости от массы ВВ в ступени и расстояния от взрыва до охраняемого объекта может быть определена согласно [3, 5] по следующему выражению (при расстоянии менее 1500 м):

$$v = K \sqrt{\frac{Q}{R^3}}, \text{ см/с}, \quad (4)$$

где v – скорость сейсмических колебаний, см/с; Q – масса одновременно взрываемых зарядов (масса ВВ в ступени замедления), кг; R – расстояние до объекта, м; K – коэффициент, зависящий от грунтовых условий (скальные, полускальные грунты ($K = 200 - 300$); песчаноглинистые ($K = 300 - 450$); рыхлые, обводненные и насыпные грунты ($K = 450 - 600$)).

Таким образом, определив допустимую скорость колебаний участка борта (3) и подставив полученное значение в выражение (4), можно определить в зависимости от расстояния допустимую массу ВВ на ступень замедления. Учитывая, что в настоящее время средства взрывания могут обеспечить независимую работу каждого заряда ВВ в скважине, то с применением таких расчетов можно оптимизировать параметры буровзрывных работ и добиться значительного снижения эффекта сейсмического воздействия взрыва на охраняемый массив и объект.

Представленный способ решения задачи позволяет произвести предварительные расчеты, оценить возможное воздействие взрывных работ на охраняемый объект (газопровод высокого давления) и принять соответствующие технические решения по ведению горных работ.

На практике [7] методика исследований включает натурные измерения величин сейсмических волн при проведении взрывных работ на карьерах и рудниках, статистическую обработку экспериментальных данных, контроль влияния взрывных работ на охраняемые объекты и расчеты допустимых величин зарядов ВВ в различных условиях.

После замеров полученные величины (векторное значение максимальной результирующей скорости колебаний грунта) сравнивают с расчетными допустимыми значениями скорости сейсмических колебаний. В целом такой подход может быть осуществлен согласно схеме, указанной на рис. 1.

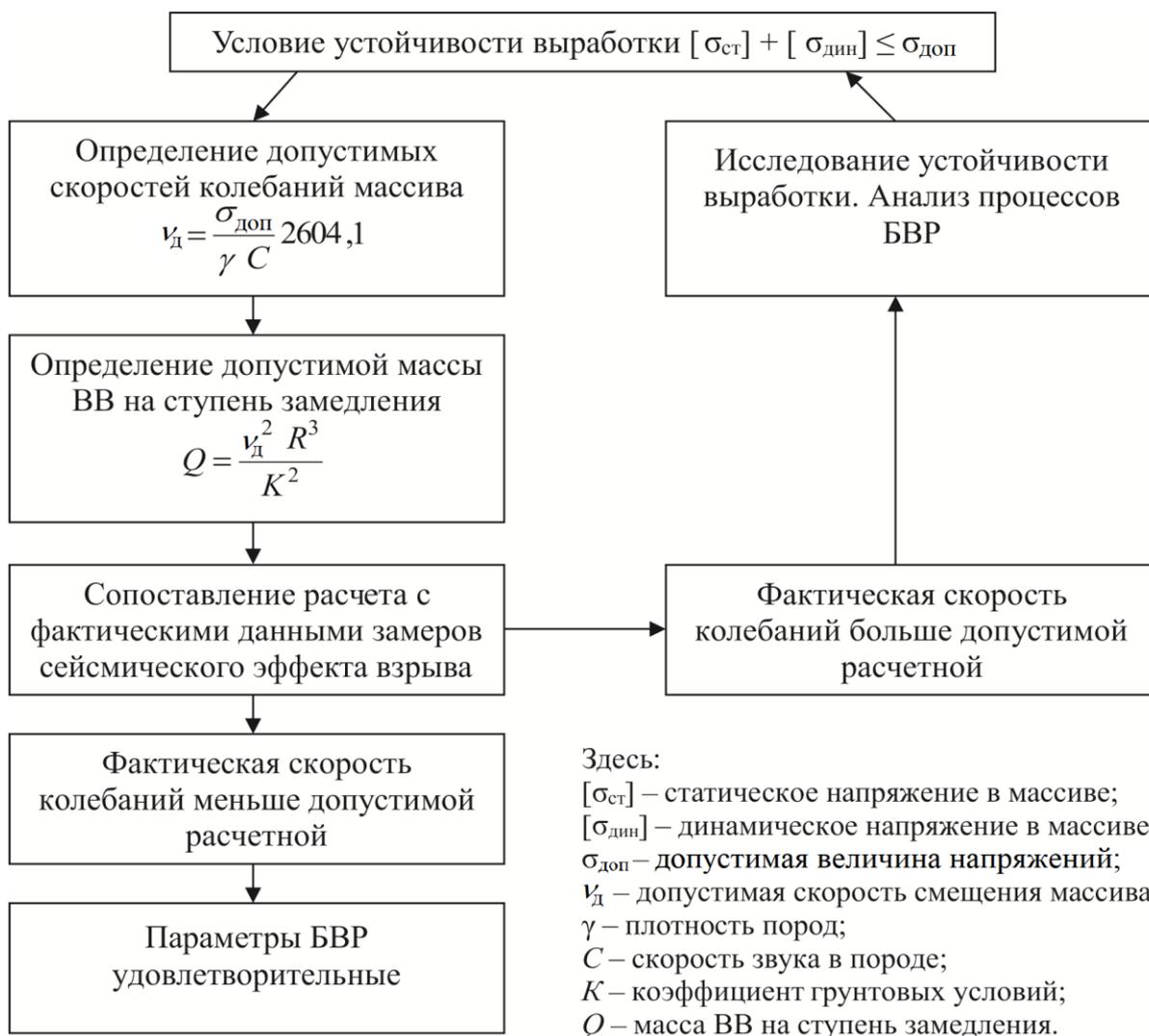


Рис. 1 – Схема к анализу сейсмического действия взрыва

Таким образом, сравнение расчетных и экспериментальных данных позволяет вести наблюдения за сейсмоустойчивостью горного массива при ведении взрывных работ вблизи охраняемого комплекса. В данной работе специальные экспериментальные исследования не были предусмотрены. Применена лишь расчетная часть схемы исследований.

Расчет сейсмоустойчивости грунтов при технологических взрывах

Необходимые исходные данные для расчета сейсмоустойчивости в имеющихся геологических материалах представлены не в полном объеме. Поэтому часть данных для расчета принята из справочной литературы [8 - 12].

Исходные данные и расчетные значения сейсмоустойчивости грунтов представлены в табл. 1.

На основании исходных данных выполнен расчет и произведено сравнение допустимой скорости колебаний, которая для сейсмической активности 6 – 7 баллов составляет $v_d = 0,06$ м/с согласно [12] с расчетной. Расчетные допустимые скорости по условию

сейсмоустойчивости (отмечено в табл. 1 серым цветом, с полужирным очертанием текста) превышают указанное значение в большинстве случаев, что свидетельствует о значительном запасе сейсмоустойчивости суглинка и скального грунта. При этом согласно [3, 5, 8, 13 – 18] многие расчетные значения могут отличаться от фактических свойств, особенно когда исследуется неоднородный массив. Насыпной же грунт может потерять сейсмоустойчивость при колебаниях 0,03 м/с. С учетом схемы прокладки газопровода в указанных грунтах для дальнейших расчетов опасной массы ВВ в ступени замедления, провоцирующей сейсмическую активность выше 7 баллов у газопровода, значения допустимой скорости приняты $v_d = 0,06$ м/с.

Таблица 1

Исходные данные и расчетные значения сейсмоустойчивости грунтов

Порода	Плотность, т/м ³	Прочность на сжатие в образце, МПа			Коэффициент Пуассона	Модуль упругости, ГПа	Скорость продольных волн в грунте, м/с	Скорость поперечных волн в грунте, м/с	Принятый коэффициент структурного ослабления	Прочность на сжатие в массиве, МПа			Допустимая скорость сейсмических колебаний грунта, м/с
		Прочность на сжатие в образце, МПа	Прочность на растяжение в образце, МПа	Прочность на сжатие в массиве, МПа						Прочность на растяжение в массиве, МПа	Принятая допустимая величина напряжений, МПа		
Насыпной грунт (щебень с примесями)	1,72	0,18	0,02	0,25	0,001	1300	751	1,00	0,18	0,02	0,03	0,03	
	1,86	0,22	0,03	0,25	0,001	1350	779	1,00	0,22	0,03	0,03	0,04	
	2,00	0,25	0,03	0,25	0,001	1400	808	1,00	0,25	0,03	0,04	0,04	
Суглинок континентальный твердый (сильнопучинистый)	1,82	1,50	0,15	0,35	0,025	1700	817	0,80	1,20	0,12	0,16	0,13	
	1,89	2,00	0,20	0,35	0,025	1930	927	0,80	1,60	0,16	0,21	0,15	
	1,96	2,50	0,25	0,35	0,025	2160	1038	0,80	2,00	0,20	0,26	0,16	
Суглинок делювиальный твердый	1,72	1,00	0,10	0,33	0,017	1500	756	0,70	0,70	0,07	0,09	0,09	
	1,81	1,50	0,15	0,33	0,017	1700	856	0,70	1,05	0,11	0,14	0,12	
	1,89	2,00	0,20	0,33	0,017	1900	957	0,70	1,40	0,14	0,18	0,13	
Супесь алювиальная твердая (ненабухающий грунт)	1,84	2,50	0,31	0,29	0,028	1450	789	0,50	1,25	0,16	0,20	0,20	
	1,92	2,65	0,33	0,29	0,028	1575	857	0,50	1,33	0,17	0,22	0,19	
	2,00	2,80	0,35	0,29	0,028	1700	925	0,50	1,40	0,18	0,23	0,17	
Скальный грунт прочный (известняк)	2,42	64,30	6,43	0,26	34,00	3430	1953	0,10	6,43	0,64	0,84	0,26	
	2,56	79,95	8,00	0,26	38,00	4590	2614	0,10	8,00	0,80	1,04	0,23	
	2,70	95,60	9,56	0,26	42,00	5750	3275	0,10	9,56	0,96	1,24	0,21	

Кратчайшее расстояние от карьера до газопровода характеризуется следующими точками. На границе карьера ОАО «Сухоложскцемент» выбраны точки (1-К и 2-К), на охраняемом объекте (1-Г и 2-Г) (рис. 2).

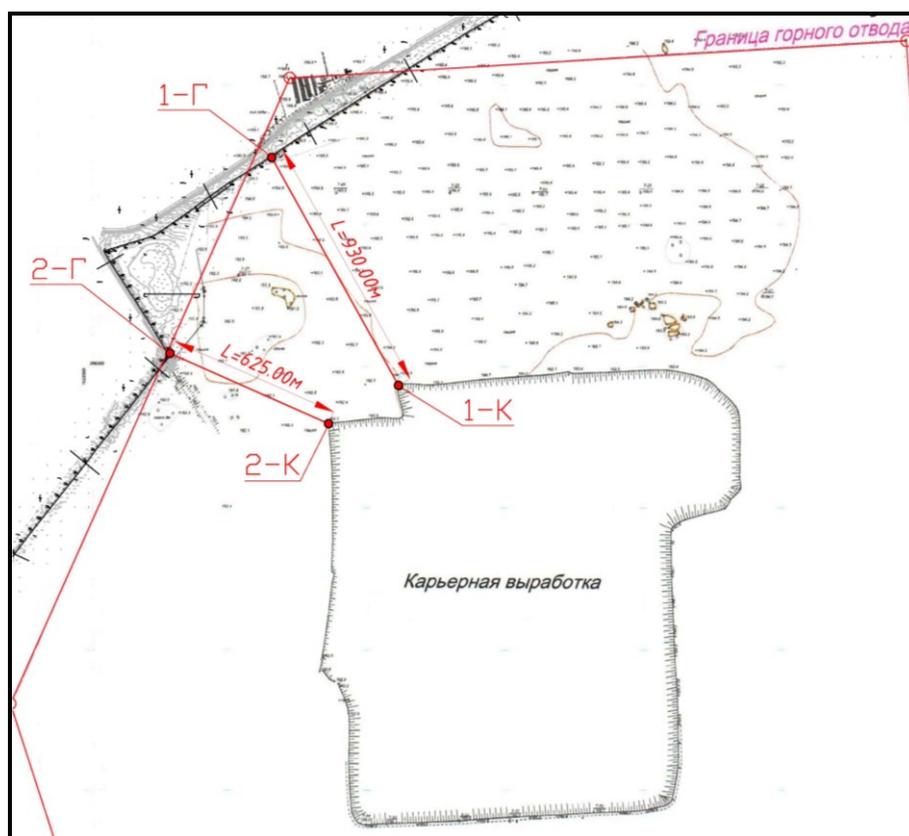


Рис. 2 – Точки (1-К и 2-К) на границе карьера ОАО «Сухоложскцемент», а также на охраняемом объекте (1-Г и 2-Г)

Согласно выбранным точкам и допустимой скорости колебаний грунта $v_d = 0,06$ м/с при коэффициентах грунтовых условий: 300 (скальные, полускальные грунты); 450 (песчаноглинистые); 600 (рыхлые, обводненные и насыпные грунты) – произведены расчеты, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные значения опасной массы ВВ на ступень замедления

Объект	Номер точки		Кратчайшее расстояние от границы карьера до охраняемого объекта L , м	Допустимая скорость колебаний незастроенного грунта v_d , м/с	Средний коэффициент грунтовых условий K	Опасная масса ВВ на ступень замедления для откосных и грунтовых сооружений Q , кг
	объекта	карьера				
Газопровод высокого давления II категории диаметром 225 мм	1 – Г	1 – К	930	0,06	300	321742,80
					450	142996,80
					600	80435,70
	2 – Г	2 – К	625		300	97656,25
					450	43402,78
					600	24414,06

Определение безопасных расстояний для газопровода высокого давления

Для определения допустимых расстояний до охраняемого объекта путем преобразования формулы (4) выразили $R(L_0)$ и получили выражение следующего вида:

$$R(L_0) = \sqrt[3]{\frac{QK^2}{g^2}}, \text{ м.} \quad (5)$$

По полученной формуле был произведен многовариантный расчет допустимых расстояний от взрыва до охраняемого объекта для 5-ти инженерно-геологических элементов в зависимости от массы ВВ в ступени, коэффициента грунтовых условий и допустимой скорости сейсмических колебаний. В зависимости от глубины взрыва в карьере и соответствующих геологических данных, путем изменения массы в ступени замедления возможно полностью исключить негативное влияние взрыва на район укладки газопровода.

Для определения безопасных расстояний до газопровода высокого давления в зависимости от угла борта карьера ОАО «Сухоложскцемент» и глубины проведения взрывных работ в карьере предложено следующее выражение:

$$L_{H(x)} = L_0 + \sqrt{(H_{\text{взр}(x)} / \sin(\alpha))^2 - H_{\text{взр}(x)}^2}, \text{ м}, \quad (6)$$

где $L_{H(x)}$ – безопасное расстояние до охраняемого объекта при глубине $H_{\text{взр}(x)}$;

L_0 – допустимое расстояние от границы карьера до газопровода высокого давления;

$H_{\text{взр}(x)}$ – глубина проведения взрывных работ в карьере; α – угол борта карьера.

В качестве примера рассмотрен вариант со следующими параметрами: масса ВВ $Q = 260$ кг; допустимое расстояние $L_0 = 86$ м (5); глубина проведения взрывных работ в карьере $H_{\text{взр}(x)} = 50$ м; угол борта карьера $\alpha = 40^\circ$. Подставив исходные данные в формулу (6), получим значение безопасного расстояния до охраняемого объекта:

$$L_H = 86 + \sqrt{(50/\sin(40^\circ))^2 - 50^2} = 145,6 \text{ м}.$$

Для наглядности на рис. 3 представлена схема по определению безопасных расстояний до газопровода высокого давления.

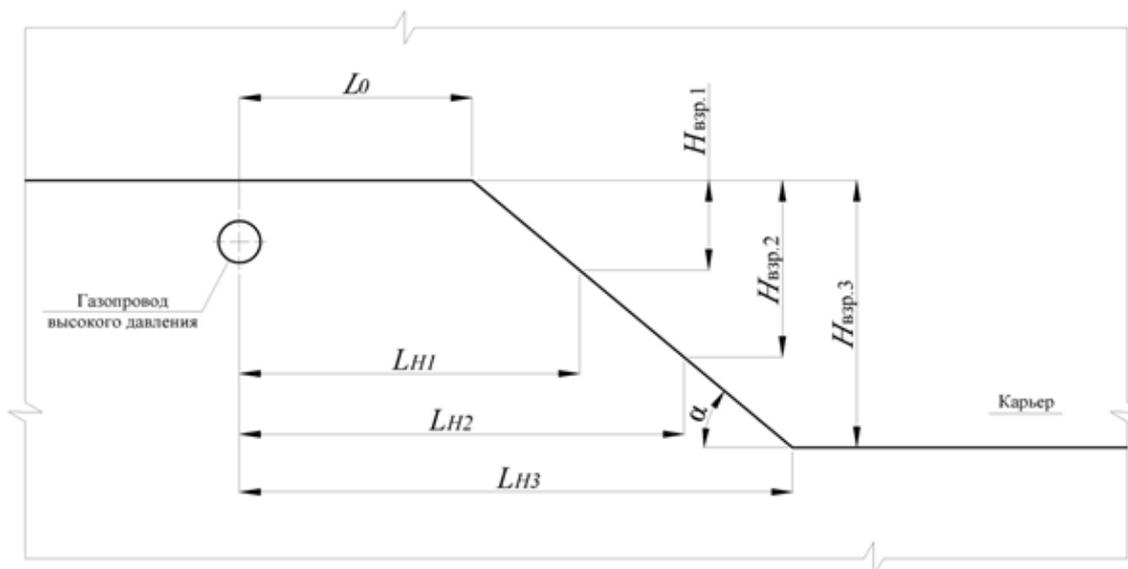


Рис. 3 – Схема по определению безопасных расстояний от места проведения взрывных работ в карьере до охраняемого объекта

Выводы

Проведенные исследования позволили установить необходимые меры безопасности при производстве буровзрывных работ вблизи эксплуатируемого газопровода высокого давления, а именно ограничения по массе ВВ и способ определения необходимых безопасных расстояний в зависимости от глубины взрыва в карьере.

Выполнен в вариантах динамический расчетный анализ силового воздействия от взрывных работ на грунты и газопровод высокого давления. Для исследуемых условий рекомендовано установить ограничения по массе ВВ на уровне минимальных опасных значений.

Опасная масса ВВ, взорванная в карьере одновременно, для откосных сооружений карьера и газопровода высокого давления, в зависимости от принятого коэффициента грунтовых условий, допустимой скорости колебаний незастроенного грунта (0,06 м/с) и кратчайшего расстояния от границ карьера до охраняемого объекта ($L = 625$ м) следующая:

- при $K = 300$ составляет – 97,0 т;
- при $K = 450$ составляет – 43,0 т;
- при $K = 600$ составляет – 24,0 т.

На основе исследований разработаны следующие рекомендации по производству взрывов. Согласно имеющимся сведениям, в карьере взрываются блока по 100 скважин. Общая масса зарядов в таких блоках может достигать до 26 – 30 т. При большом количестве скважин возможно случайное совпадение одновременного срабатывания разных ступеней замедления, что фактически может увеличить общую массу в ступени и вызвать увеличенные колебания. Поэтому рекомендуется для предстоящих взрывов проектировать схему инициирования зарядов с массой в ступени замедления (Q) менее 1 т. При замедлении каждой скважины с массой заряда $Q = 260$ кг при расстоянии (L) более 230 м от места взрыва до газопровода потеря сейсмоустойчивости грунта маловероятна. При этом следует отметить, что существенное количество скважин ввиду погрешностей срабатывания средств инициирования может привести к тому, что в ступени замедления сработает больше зарядов, чем предполагается схемой инициирования. Поэтому, чтобы исключить межблочные подвижки в массиве горных пород, не рекомендуется увеличивать количество скважин во взрываемом блоке более чем в два раза (относительно 100 скв.).

Для решения задачи по определению безопасных расстояний от места проведения взрывных работ в карьере до газопровода высокого давления предложена расчетная схема, в основе которой лежат выражения (5) и (6), позволяющие определять безопасные расстояния до газопровода в любой точке по глубине карьера.

Литература

1. Методика измерений скорости сейсмических колебаний и давления на фронте ударной воздушной волны с использованием цифрового сейморегистратора MINI-MATEPLUS, устройства регистрации и анализа Уран и автономного измерителя – регистратора АИР / ИГД УрО РАН № 88-16359-118-01.00076-2011. - Екатеринбург, 2011. – 15 с.
2. Методика обеспечения сейсмобезопасной технологии ведения взрывных работ. – Свердловск: ИГД МЧМ СССР, 1984. – 12 с.
3. Шеменев В.Г. О состоянии научных исследований в области разрушения горных пород в Институте горного дела УрО РАН / В.Г. Шеменев, С.Н. Жариков // Проблемы недропользования. – 2016. – № 4 (11). – С. 30 - 40. - DOI: 10.18454/2313-1586.2016.04.030.
4. Жариков С.Н. Способы уточнения свойств горных пород при производстве буровзрывных работ / С.Н. Жариков, В.Г. Шеменев, В.А. Кутуев // Устойчивое развитие горных территорий. – 2017. – Т. 9. – № 1. – С. 74 – 80. DOI: 10.21177/1998-4502-2017-9-1-74-80.
5. Буровзрывные работы на кимберлитовых карьерах Якутии / И.Ф. Бондаренко, С.Н. Жариков, И.В. Зырянов, В.Г. Шеменёв. - Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2017. – 172 с.
6. Жариков С.Н. Изучение сейсмического действия взрыва в карьере для внедрения специальной технологии заоткосных работ / С.Н. Жариков, В.А. Кутуев // Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей:

материалы всероссийской конф. с междунар. участием / Институт геофизики УрО РАН. – Екатеринбург, 2017. – С. 179 - 183.

7. Жариков С.Н. Результаты экспериментальных исследований динамического действия взрыва на предельном контуре карьера Джетыгаринского месторождения / С.Н. Жариков, В.А. Кутуев // Проблемы недропользования. – 2019. – № 2 (21). – С. 20 - 26. – DOI: 10.25635/2313-1586.2019.02.020.

8. Распределение и корреляция показателей физических свойств горных пород / М.М. Протодяконов, Р.И. Тедер, Е.И. Ильницкая и др. – М.: Недра, 1981. – 192 с.

9. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород / сост. М.М. Протодяконов, Е.И. Ильницкая, Р.И. Тедер и др.; под ред. акад. Н. В. Мельникова и др. – М.: Недра, 1975. – 279 с.

10. Ржевский В.В. Основы физики горных пород / В.В. Ржевский, Г.Я. Новик. – М.: Недра, 1984. – 359 с.

11. Ржевский В. В. Физико-технические параметры горных пород / В.В. Ржевский. – М.: Наука, 1975. – 212 с.

12. Друкованый М.Ф. Методы управления взрывом на карьерах / М.Ф. Друкованый. – М.: Недра, 1973. – 415 с.

13. Kumar R. Determination of blast-induced ground vibration equations for rocks using mechanical and geological properties / Kumar R., Choudhury D., Bhargava K. // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2016. – V. 8. – № 3 – P. 341-349. - doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.10.009.

14. Keshavarz A. Seismic bearing capacity of strip footings on rock masses using the Hoek-Brown failure criterion / A. Keshavarz, A. Fazeli, S. Sadeghi // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2016. – V. 8. – P. 170 - 177.

15. Blast wave induced spatial variation of ground vibration considering field geological conditions / Y.L. Gui, Z.Y. Zhao, L.B. Jayasinghe, H.Y. Zhou, A.T.C. Goh, M. Tao // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2018. – V. 101. – P. 63-68. - doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.11.016.

16. Snelling P. The role of geologic structure and stress in triggering remote seismicity in Creighton Mine, Sudbury, Canada / P. Snelling, L. Godin, S. McKinnon // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2013. – V. 58. – P. 166-179. - doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.10.005.

17. Analytical study of ground motion caused by seismic wave propagation across faulted rock masses / J.C. Li, N.N. Li, S.B. Chai, H.B. Li // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. – 2017. – V. 42. – № 1. – P. 95-109. - doi.org/10.1002/nag.2716.

18. Tripathy G.R. Safety of engineered structures against blast vibrations: A case study / G.R. Tripathy, R.R. Shirke, M.D. Kudale // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. - 2016. – V. 8. - P. 248 - 255.