



**ИССЛЕДОВАНИЕ ДОПУСТИМОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА ПЛОЩАДКУ
ПРОКЛАДКИ ГАЗОПРОВОДА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ В СВЯЗИ С ПРОИЗВОДСТВОМ
ВЗРЫВНЫХ РАБОТ ПРИ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

В. А. Кутуев, С. Н. Жариков

*Институт горного дела УрО РАН, E-mail: slavik1988@mail.ru,
ул. Мамина-Сибиряка 58, г. Екатеринбург 620075, Россия*

Представлены результаты исследования допустимой динамической нагрузки на площадку прокладки газопровода высокого давления, размещенного в границах горного отвода, в связи с производством взрывных работ на карьере ОАО “Сухоложскцемент”. Приведена методика для расчета допустимых расстояний от технологического взрыва в карьере до газопровода в зависимости от массы ВВ в ступени, коэффициента грунтовых условий и допустимой скорости сейсмических колебаний. Установлено, что путем изменения массы в ступени замедления можно полностью исключить негативное влияние взрыва на район укладки газопровода. Предложена расчетная схема для определения безопасных расстояний до газопровода высокого давления в зависимости от угла борта и глубины проведения взрывных работ в карьере.

Сейсмическое действие взрыва, сейсмоустойчивость, взрывные работы, разрушение горных пород, физико-механические свойства горных пород, газопровод высокого давления, безопасные расстояния

**ESTIMATION OF ALLOWABLE DYNAMIC LOADS AT LOCATIONS OF BURIED
HIGH-PRESSURE GAS PIPELINES WITH RESPECT TO BLASTING OPERATIONS
IN OPEN PIT MINES**

V. A. Kutuev and S. N. Zharikov

*Institute of Mining, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, E-mail: slavik1988@mail.ru,
ul. Mamina-Sibiryaka 58, Yekaterinburg 620075, Russia*

Results of the study of allowable dynamic load at the location of category II buried high-pressure gas pipeline within the bounds of the mining property, in connection with blasting operations at the quarry of “Sukholozhsktsement” Company are presented. A calculation technique for estimating distances from the technological blast in opencast mine to the gas pipeline facility depending on the mass of explosives at delay stages, on the soil condition coefficient and ground velocity of vibration rate is proposed. We found that it is possible to completely eliminate the negative impact from explosion on the gas pipeline facility by changing mass of explosive in delay stages. A calculation scheme is also proposed to determine safe distances to the high-pressure gas pipeline based on the bench face angle and depth of blasting works in open pit mine.

Seismic effect of blasting, seismic resistance, blasting operations, destruction of rocks, physical and mechanical properties of rocks, high pressure gas pipeline, safe distances

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 найти допустимые расстояния от технологических взрывов и горных работ в карьере до газопровода, а также сейсмоустойчивость площадки размещения.

Работа направлена на повышение уровня безопасной эксплуатации газопровода и установление ограничений по воздействию горных работ в направлении места прокладки газопровода.

В рамках исследования необходимо было определить:

— допустимые скорости сейсмических колебаний и перемещений грунта в зоне прокладки газопровода высокого давления II категории диаметром 225 мм, при которых сохраняется безопасная эксплуатация;

— безопасное расстояние (зону, величину откоса) от газопровода, при котором в виду геологических особенностей запрещена сейсмическая активность выше 6 и 7 баллов.

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

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ СКОРОСТИ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Динамика воздействия от взрывных работ проявляется в сейсмических колебаниях грунта. Влияние сейсмического воздействия при массовых взрывах определяется в двух направлениях. Во-первых, оно не должно привести к потере устойчивости массива в границах площадки объекта, во-вторых, колебания грунта под сооружением (газопроводом высокого давления) не должны вызвать его разрушение. Для выполнения комплекса расчетов сейсмоустойчивости грунтов на площадках объектов и допустимых значений скорости колебаний для газопровода высокого давления в границах горного отвода карьера ОАО “Сухоложкцемент”, использованы разработки ИГД УрО РАН [1–4].

Допустимое значение скорости сейсмических колебаний находится в соответствии с допустимым значением напряжений в массиве $\sigma_{\text{доп}}$, которое характеризует сейсмоустойчивость выработки:

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

где $\sigma_{\text{ст}}$ — статическое напряжение в массиве, окружающем выработку, МПа; $\sigma_{\text{дин}}$ — динамическое напряжение в массиве (около выработки), МПа.

Все последующие расчеты подразумевают, что условие (1) соблюдается и исследуемый массив горных пород устойчив. В приближении за $\sigma_{\text{доп}}$ можно принимать статический предел прочности пород на растяжение в массиве σ_p , увеличенный на 10–30 % [3]. Следует отметить, что из-за макронарушений величина σ_p в образце существенно отличается от его значения в массиве. В массиве σ_p меньше, чем в образце в 5–10 и более раз [3], так как породы обычно перемешаны между собой. Кроме того, на эту величину оказывает большое влияние трещиноватость и материал заполнения пустот. Расчет прочности массива на растяжение осуществляется с помощью коэффициента структурного ослабления, который ввиду масштабного эффекта в настоящее время можно найти только экспериментально, при этом на разных участках массива в одной породе он значительно различается. Учитывая, что способы определения реального состояния массива пока находятся в развитии и требуют дополнительных исследований для приближенных расчетов прочность пород в массиве скальных пород можно принять $0.1\sigma_p$ от значения в образце.

Согласно [3] допустимая скорость смещения массива вычисляется по выражению:

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

где $\sigma_{\text{доп}}$ — допустимое напряжение, кгс/см²; γ — плотность пород, т/м³; C — скорость звука в породе, см/с.

Согласно системе СИ (2) можно записать в следующей форме:

$$v_d = \frac{\sigma_{\text{доп}}}{\gamma C} 2604.1 \text{ м/с}, \quad (3)$$

Скорость сейсмических колебаний в зависимости от массы ВВ в ступени и расстояния от взрыва до охраняемого объекта рассчитывается, согласно [3], по формуле (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 ($K = 450 - 600$)).

Определив допустимую скорость колебаний участка борта (3) и подставив в (4), находим 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, с применением таких расчетов можно оптимизировать параметры буровзрывных работ и добиться значительного снижения эффекта сейсмического воздействия взрыва на охраняемый массив и объект. Представленный способ позволяет провести предварительные расчеты, оценить возможное воздействие взрывных работ на охраняемый объект (газопровод высокого давления) и принять соответствующие технические решения по ведению горных работ.

На практике методика исследований включает натурные измерения сейсмических волн при проведении взрывных работ на карьерах и рудниках, статистическую обработку экспериментальных данных, контроль влияния взрывных работ на охраняемые объекты и расчеты зарядов ВВ в различных условиях. После замеров полученные величины (векторное значение максимальной результирующей скорости колебаний грунта) сравнивают с расчетными допустимыми значениями скорости сейсмических колебаний. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных позволяет вести наблюдения за сейсмоустойчивостью горного массива при ведении взрывных работ вблизи охраняемого комплекса. В этой работе специальные экспериментальные исследования не предусмотрены, приведена только расчетная часть схемы исследований.

РАСЧЕТ СЕЙСМОУСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВ ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВЗРЫВАХ

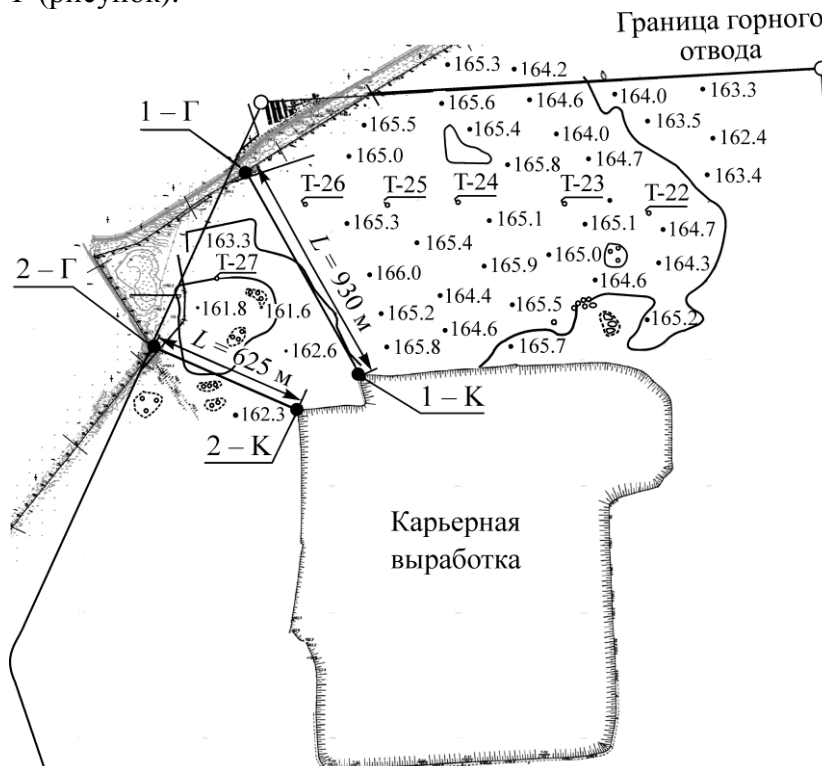
Необходимые исходные данные для расчета сейсмоустойчивости в имеющихся геологических материалах представлены не в полном объеме, поэтому некоторые из них приняты из справочной литературы [5 – 11]. Исходные и расчетные значения сейсмоустойчивости грунтов представлены в табл. 1.

Проведено сравнение допустимой скорости колебаний, которая для сейсмической активности 6 – 7 баллов составляет $v_d = 0.06$ м/с, согласно [11], с расчетной. Расчетные допустимые скорости по условию сейсмоустойчивости (отмечены в табл. 1 серым цветом) в большинстве случаев превышают указанное значение, что свидетельствует о значительном запасе сейсмоустойчивости суглинка и скального грунта, а насыпной грунт может потерять сейсмоустойчивость при колебаниях 0.03 м/с. Учитывая схему прокладки газопровода в таких грунтах, для дальнейших расчетов опасной массы ВВ в ступени замедления, провоцирующей сейсмическую активность выше 7 баллов у газопровода, значение допустимой скорости принято $v_d = 0.06$ м/с.

ТАБЛИЦА 1. Исходные данные и расчетные значения сейсмостойчивости грунтов

Порода	Плотность, т/м ³	Прочность на сжатие в образце, МПа	Прочность на растяжение 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	Прочность на растяжение в массиве, МПа	Принятая допустимая величина напряжений, МПа	Допустимая скорость сейсмических колебаний грунта, м/с
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 (рисунок).



Точки 1-К и 2-К на границе карьера ОАО “Сухоложскцемент” и точки 1-Г и 2-Г на охраняемом объекте (газопровод высокого давления)

Согласно выбранным точкам и допустимой скорости колебания грунта $v_d = 0.06$ м/с при коэффициентах грунтовых условий: 300 (скальные, полускальные грунты), 450 (песчаноглинистые), 600 (рыхлые, обводненные и насыпные грунты) проведены расчеты (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 вычисления допустимых расстояний до охраняемого объекта путем преобразования формулы (4) получено выражение

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

По формуле (5) выполнен многовариантный расчет допустимых расстояний от взрыва до охраняемого объекта для пяти 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 можно полностью исключить негативное влияние взрыва на район укладки газопровода.

Расчет безопасных расстояний до газопровода высокого давления в зависимости от угла борта карьера ОАО “Сухоложскцемент” и глубины проведения взрывных работ осуществляется следующим образом

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

где $H(x)$ — 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, при котором масса ВВ $Q = 260$ кг, допустимое расстояние $L_0 = 86$ м, глубина проведения взрывных работ в карьере $H_{\text{взр}(x)} = 50$ м, угол борта карьера $\alpha = 40^\circ$. Подставив исходные данные в (6), получим значение безопасного расстояния до охраняемого объекта

$$L_H = 86 + \sqrt{[50/\sin 40^\circ]^2 - 50^2} = 145.6 \text{ м.}$$

ВЫВОДЫ

Анализ силового воздействия от взрывных работ на грунты и газопровод высокого давления показал, что необходимы ограничения массы ВВ до минимально опасных значений. При большом количестве взрывааемых блоков возрастает вероятность одновременного срабатывания разных ступеней замедления, что фактически может увеличить общую массу в ступени и усилить сейсмические колебания грунта. Предлагается проектировать схему инициирования зарядов с

массой ВВ в ступени замедления менее 1 т. Кроме того, повышенное количество скважин ввиду погрешностей срабатывания средств инициирования может привести к тому, что в ступени замедления сработают больше зарядов, чем предполагается схемой инициирования. Чтобы исключить межблочные подвижки в массиве горных пород, не рекомендуется увеличивать количество скважин во взрываемом блоке более чем в два раза. Для решения задачи определения безопасных расстояний от места проведения взрывных работ в любой точке по глубине карьера до газопровода высокого давления предложена расчетная схема.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Methodology** the Institute of mining UB RAS, no. 88-16359-118-01.00076-2011. [**Методика** ИГД УрО РАН № 88-16359-118-01.00076-2011. — 15 с.]
2. **Methods** of providing seismic technology of blasting, Sverdlovsk, IM MISI USSR, 1984, 12 pp. (in Russian) [**Методика** обеспечения сейсмобезопасной технологии ведения взрывных работ. — Свердловск: ИГД МЧМ СССР, 1984. — 12 с.]
3. **Bondarenko I. F., Zharikov S. N., Zyryanov I. V., and Shemenev V. G.** Drilling and blasting works at kimberlite quarries of Yakutia. Ekaterinburg, Institute of Mining, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, 2017, 172 pp. (in Russian) [**Бондаренко И. Ф., Жариков С. Н., Зырянов И. В., Шеменев В. Г.** Буровзрывные работы на кимберлитовых карьерах Якутии. — Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2017. — 172 с.]
4. **Zharikov S. N. and Kutuev V. A.** Study of the seismic action of the explosion in the quarry for the introduction of special technology of slope works, Deep structure, geodynamics, thermal field of the Earth, interpretation of geophysical fields: Materials of the all-Russian Conf. with International Participation, Ekaterinburg, Institute of Geophysics of Ural branch, Russian Academy of Sciences, 2017, pp. 179–183 (in Russian) [**Жариков С. Н., Кутуев В. А.** Изучение сейсмического действия взрыва в карьере для внедрения специальной технологии заоткосных работ // Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей: материалы Всерос. конф. с Междунар. участием. — Екатеринбург: Изд-во Института геофизики УрО РАН, 2017. — С. 179–183.]
5. **Distribution** and correlation of indicators of physical properties of rocks, Moscow, Nedra, 1981, 192 pp. (in Russian) [**Распределение** и корреляция показателей физических свойств горных пород. — М.: Недра, 1981. — 192 с.]
6. **Handbook** (Cadastre) on Physical Properties of Rocks, Moscow, Nedra, 1975, 279 pp. (in Russian) [**Справочник** (кадастр) физических свойств горных пород. — М.: Недра, 1975. — 279 с.]
7. **Rzhevsky V. V. and Novik G. Ya.** Fundamentals of rock physics, Moscow, Nedra, 1984, 359 pp. (in Russian) [**Ржевский В. В., Новик Г. Я.** Основы физики горных пород. — М.: Недра, 1984. — 359 с.]
8. **Rzhevsky V. V.** Physical and technical parameters of rocks, Moscow, Nauka, 1975, 212 pp. (in Russian) [**Ржевский В. В.** Физико-технические параметры горных пород. — М.: Наука, 1975. — 212 с.]
9. **Minerals.** Reference book in IV volumes, Moscow, AS USSR, 1960–1992 (in Russian) [**Минералы.** Справочник в IV томах. — М.: АН СССР, 1960–1992.]
10. **Physical properties** of rocks and minerals (petrophysics), Handbook of Geophysics, Moscow, Nedra, 1984, 455 pp. (in Russian) [**Физические свойства** горных пород и полезных ископаемых (петрофизика): справочник геофизика. — М.: Недра, 1984. — 455 с.]
11. **Drukovanuy M. F.** Control methods explosion in the pits. Moscow, Nedra, 1973, 415 pp. (in Russian) [**Друкovaný М. Ф.** Методы управления взрывом на карьерах. — М.: Недра, 1973. — 415 с.]