

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 622.235

А. Г. Новиньков, С. И. Протасов, П. А. Самусев, А. С. Гукин

СЕЙСМИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПОДЗЕМНОГО ГАЗОПРОВОДА ПРИ МАССОВЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВАХ НА УГОЛЬНОМ КАРЬЕРЕ

В работе рассматривается сейсмическая безопасность подземного газопровода, проходящего в пределах 320 м от лицензионных границ разреза. Газопровод выполнен из стали 17Г1С, наружный диаметр трубопровода 1020 мм, толщина стенки 10,5 мм, номинальное давление транспортируемой среды 4,5 МПа. Глубина заложения трубопровода составляет 0,8-1,2 м, преобладающий вид оснований под газопроводом – суглинки.

Действующие нормативные документы в области обеспечения сейсмической безопасности взрывных работ [1] не распространяются на подземные газопроводы. Кроме того, критерии, приведенные в упомянутом документе, соответствуют 10%-ной вероятности появления в зданиях легких повреждений типа поверхностных трещин в штукатурке и, конечно же, не могут применяться к подземным трубопроводам.

С другой стороны, имеются рекомендации Всесоюзного НИИ по строительству магистральных трубопроводов (ВНИИСТ) [2]. Однако эти рекомендации не предназначены для трубопроводов, проходящих вблизи горных отводов в условиях повторяющихся взрывов. Так, например, нижний предел сейсмобезопасной массы Q_c для расстояния до рассматриваемого трубопровода в 320 м, подсчитанный по формуле (9) из [2] составляет:

$$Q_c = \alpha \cdot K_b \cdot K_t \cdot \frac{R^3}{400} = 1 \cdot 0,8 \cdot 0,7 \cdot \frac{320^3}{400} = 45875 \text{ кг}$$

где $\alpha=1.0$ – для взрывов нормального рыхления; $K_b=0.8$ – для массивов повышенной влажности; $K_t=0.7$ – для участков трубопроводов с температурой $>40^\circ\text{C}$; $R = 320$ м – расстояние от стенки трубопровода до ближайшего заряда или группы зарядов.

Максимальная величина сейсмически безопасного заряда для наиболее неблагоприятных условий, подсчитанная по формуле (10) из [2]:

$$Q_c = \alpha \cdot K_e \cdot K_s \cdot K_u \cdot K_h \cdot K_t \cdot \frac{R^3 \cdot (\sigma_1 - \sigma_{np})}{35000} = \\ = 0,7 \cdot 0,65 \cdot 0,9 \cdot 0,7 \cdot \frac{320^3 (2989 - 2718)}{35000} = 72728 \text{ кг},$$

где $K_e=0,7$ – для водонасыщенных трещиноватых

пород категории крепости VII-XI по шкале ЕНиР; $K_s=0,65$ – для защитного покрытия трубопровода при отсутствии достоверных данных; $K_u=0,9$ – для участков трубопровода, имеющих упругий изгиб радиусом не менее $1000 \cdot D$ (D – наружный диаметр трубопровода, м); расчетное сопротивление стали $\sigma_1 = 0,61 \cdot \sigma_{np} = 0,61 \cdot 4900 = 2989 \text{ кгс}/\text{см}^2$ ($\sigma_{np} = 4900 \text{ кгс}/\text{см}^2$ – временное сопротивление стали 17Г1С по ГОСТ 19281-89); приведенные напряжения

$$\sigma_{np} = \sqrt{\sigma_0^2 - 0,8 \cdot \sigma_0 \cdot \sigma_t + 0,64 \cdot \sigma_t^2} = \\ \sqrt{2228^2 + 0,8 \cdot 2228 \cdot 1000 + 0,64 \cdot 1000^2} = 2718 \text{ кгс}/\text{см}^2$$

($\sigma_0=2228 \text{ кгс}/\text{см}^2$ – кольцевые напряжения в трубе с наружным диаметром 102 см и толщиной стенки 1,05 см при рабочем давлении среды в момент ведения взрывных работ 45 $\text{кгс}/\text{см}^2$; $\sigma_t=-1000 \text{ кгс}/\text{см}^2$ – продольные напряжения в трубопроводе от тепловой деформации). Остальные обозначения объяснены ранее.

Таким образом, рекомендуемые по [2] сейсмически безопасные массы для групп зарядов лежат в диапазоне от 45875 до 72728 кг. При этом интервал замедлений между группами должен составлять 45-50 мс. Однако, например, зарегистрированная пиковая скорость колебаний земной поверхности от одного из взрывов с общей массой ВВ на блоке 50004,5 и массой ВВ в группе всего 317 кг в тротиловом эквиваленте, составила на расстоянии 355 м от блока 25,4 мм/с, что сопоставимо с предельным рекомендуемым значением пиковой скорости в 2 дюйма/с (50,8 мм/с) для газопроводов по условиям компании Chevron (США). Таким образом, сейсмически безопасные условия ведения взрывных работ вблизи действующих трубопроводов, определенные согласно [2], не могут быть распространены на газопроводы в зоне горных отводов действующих горнодобывающих предприятий, так как эти подходы и рекомендации разработаны для совершенно для иных условий взрывания.

Согласно данным [3] для трубопроводов, проходящих вблизи горных предприятий, безопасными являются пиковые скорости колебаний земной поверхности величиной до 5 дюймов/с (127 мм/с).

Таблица 1. Характеристики записанных взрывов

| Дата взрыва | Тип используемого ВВ | Система инициирования и преобладающие замедления | Общая масса ВВ на блоке в тротиловом эквиваленте, кг | Максимальная масса ВВ в пределах 20-мс скользящего окна, кг |
|-------------|---|--|--|---|
| 05.08.11 | Нитронит Э-70, Нитронит Э-100, Гранулит РП | Электронная система инициирования Daveytronic, 21 и 105 мс | 50004,8 | 316,7 |
| 11.07.12 | Нитронит Э-70, Гранулит РП-2 | Электронная система инициирования Daveytronic, 15, 21, 84 и 105 мс | 71176,2 | 979,3 |
| 17.07.12 | Нитронит Э-70, Гранулит РП-2 | Электронная система инициирования Daveytronic, 15, 90 и 105 мс | 40893,8 | 541,8 |
| 20.09.12 | Нитронит Э-70, Гранулит РП-1, Гранулит РП-2 | Электронная система инициирования Daveytronic, 80 и 105 мс | 45883,6 | 522,6 |

Эти данные получены непосредственно из замеров деформаций и напряжений в трубопроводах. Однако рекомендации не подвергались статистической обработке и приняты на основании только суждений авторов.

С другой стороны, действующие российские нормативные документы [4] позволяют выполнить расчет на прочность магистральных трубопроводов при сейсмических воздействиях природного происхождения. Однако параметры колебаний природных землетрясений и сейсмических воздействий от промышленных взрывов существенно различаются, как по частотному составу, так и по длительности, что не позволяет перенести расчетные положения [4] на случай промышленных взрывов.

С учетом вышесказанного в работе была поставлена задача, оставаясь в рамках действующего нормативного документа [4], оценить сейсмическую опасность для газопровода с учетом особенностей ведения взрывных работ на горном предприятии.

В качестве критерия сейсмической опасности для газопровода использовалась пиковая скорость колебаний земной поверхности над трубопроводом.

Воздействие считалось безопасным, если выполнялось условие $v \leq [v]$, где v – прогнозируемая скорость колебаний на заданном расстоянии от взрываемого блока при заданной массе ВВ, а $[v]$ – предельно допустимая скорость колебаний для конкретного трубопровода.

Таблица 2. Результаты статистического тестирования регрессии

| Тестируемая гипотеза | Критерий тестирования | Результаты тестирования | Статистические выводы |
|--|---------------------------------------|--|--|
| Постоянство остатков регрессии | Критерий ранговой корреляции Спирмена | $0,266 < 1,677$, где 0,266 – статистика Спирмена, 1,677 – критическое значение распределения Стьюдента | Нулевая гипотеза об отсутствии корреляции между ранжированными остатками и приведенными расстояниями не отвергается |
| Отсутствие взаимной корреляции остатков | Критерий Дарбина-Уотсона | $0,753 < 1,420$, где 0,753 – статистика Дарбина-Уотсона; 1,420 – нижнее критическое значение статистики Дарбина-Уотсона | Автокорреляция остатков статистически значима. Гипотеза об отсутствии автокорреляции отвергается |
| Нормальное распределение остатков | Критерий χ^2 | Уровень значимости наблюдаемой статистики $p=0,001$ | Нулевая гипотеза о распределении остатков по нормальному закону почти наверняка неверна |
| Объяснимость вариаций пиковых скоростей вариациями приведенного расстояния | Коэффициент детерминации K_D | $K_D=0,752 > 0,7$ | Коэффициент детерминации выше рекомендуемых значений. Вариация скоростей на 75% объяснима вариациями приведенного расстояния |

Для решения поставленной задачи были записаны сейсмические воздействия от четырех взрывов. Параметры записанных взрывов приведены в табл. 1. Всего было записано 50 трехкомпонентных сейсмограмм по двум направлениям распространения сейсмических волн. Тест Чоу показал, что отличие параметров регрессии для двух направлений статистически незначимо и экспериментальные точки могут быть объединены в одну общую выборку.

Решение задачи прогнозирования скорости колебаний осуществлялось по методике [5] на основе классического регрессионного анализа с последующим статистическим анализом остатков. Прогнозируемая с обеспеченностью 95% скорость колебаний v записывалась в линеаризованном виде:

$$\lg v = a + b \cdot \lg R_{np} + 1,3 \cdot t \cdot SE$$

где t – квантиль уровня 0,95 распределения Стьюдента;

SE – стандартная ошибка регрессии;

$R_{np} = \frac{R}{\sqrt[3]{Q}}$ – приведенное расстояние; в свою оче-

редь R – расстояние от взрываемого блока до трубопровода, м; Q – масса ВВ в пределах скользящего 20-мс окна, кг; a , b – параметры регрессии, полученные по экспериментальному облаку точек с помощью метода наименьших квадратов. Для

условий конкретного карьера $a = 3,3373$ и $b = -1,5364$.

В рамках классического линейного регрессионного анализа выполнен статистический анализ остатков регрессии на соответствие условиям Гаусса-Маркова. При этом проверялись постоянство дисперсии остатков (гомоскедастичность) с помощью критерия ранговой корреляции Спирмена, отсутствие взаимной корреляции остатков с помощью критерия Дарбина-Уотсона. Кроме того, вычислялся коэффициент детерминации, как суммарная мера качества уравнения регрессии, а также с помощью критерия χ^2 проверялось соответствие распределения остатков нормальному закону. Результаты статистического тестирования регрессии приведены в табл. 2.

Следует отметить, что в рассматриваемом случае не получила статистического подтверждения нулевая гипотеза о соответствии фактического распределения остатков нормальному закону. Кроме того, была также отвергнута статистическая гипотеза об отсутствии автокорреляции между остатками. Общее количество точек позволило выполнить прогноз сейсмического действия с вероятностью 0,9. Данный уровень надежности прогноза аналогичен надежности по [1]. Однако, принимая во внимание ответственность сооружения, было решено повысить уровень обеспеченности до 0,95.

Учитывая результаты статистического тести-

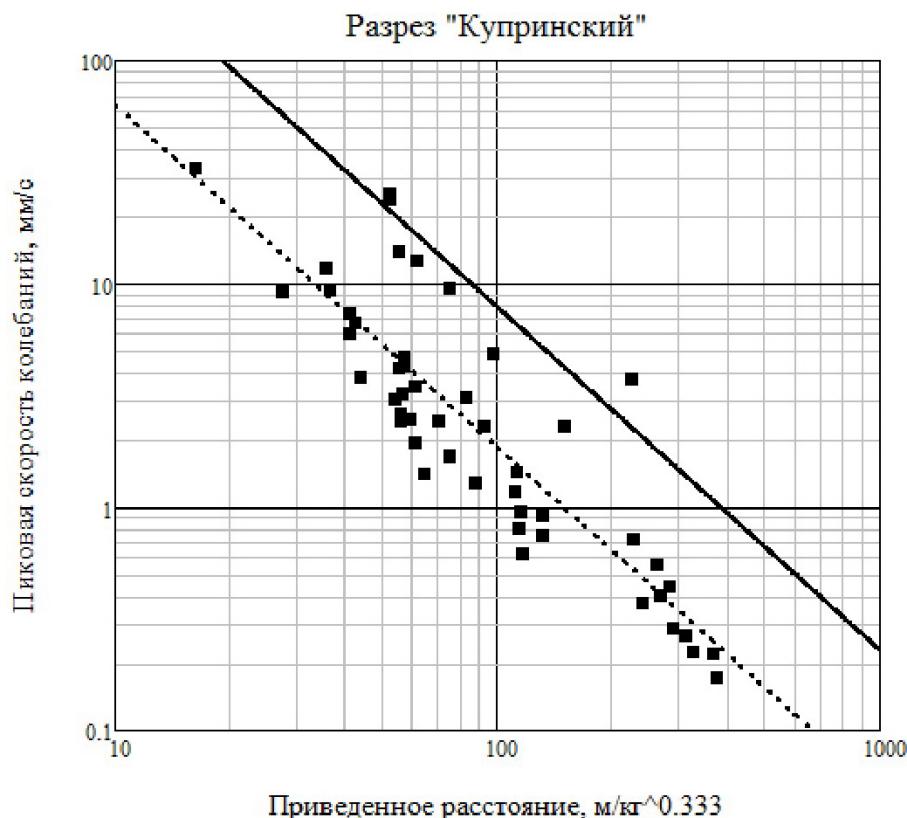


Рис. 1. Линия регрессии и расчетная верхняя граница доверительного интервала с обеспеченностью 0,95

рования остатков, а также то, что количество экспериментальных точек было меньше, чем это требуется для получения решения с обеспеченностью 0,95 (при этом увеличение количества экспериментальных точек не представлялось возможным из-за редкости взрывных работ на параметрах, приближенных к предельным), ширина доверительного 95%-го интервала была дополнительно увеличена в 1,3 раза.

Следует сказать, что анализируемый случай подтверждает необходимость проведения статистического анализа остатков регрессии.

Линия регрессии и верхняя граница расчетного 95%-го одностороннего доверительного интервала приведены на рис. 1.

Допустимая скорость колебаний грунта [v] над газопроводом определялась по следующему алгоритму.

1. Определено расчетное сопротивление стали по формуле (4) из [4], как

$R_1 = (R_1^H m) / (k_1 k_{\text{r}}) = (480 \cdot 0,9) / (1,55 \cdot 1) = 278,7 \text{ МПа}$, где $R_1^H = 480 \text{ МПа}$, нормативное временное сопротивление стали 17Г1С по ГОСТ 19281-89; $m=0,9$ – коэффициент условий работы трубопровода по табл. 1 [4]; k_1 – коэффициент надежности по материалу по табл. 9 [4]; $k_{\text{r}} = 1,0$ – коэффициент надежности по назначению, табл. 11 [4].

2. По формуле (16) из [4] определен коэффициент ψ_2 , учитывающий двухосную работу стали $\psi_2=1,0$ – при растягивающих продольных напряжениях в трубопроводе и

$$\begin{aligned} \psi_2 &= \sqrt{1 - 0,75 \cdot \left(\frac{\sigma_{\text{ку}}}{R_1} \right)^2} - 0,5 \cdot \frac{\sigma_{\text{ку}}}{R_1} = \\ &= \sqrt{1 - 0,75 \cdot \left(\frac{235,5}{278,7} \right)^2} - 0,5 \cdot \frac{235,5}{278,7} = 0,259 \end{aligned}$$

– при сжимающих напряжениях в трубопроводе.

Здесь $\sigma_{\text{ку}} = \frac{n \cdot p \cdot D_{\text{вн}}}{2 \cdot \delta_n} = \frac{1,1 \cdot 4,5 \cdot 0,999}{2 \cdot 0,0105} = 235,5 \text{ МПа}$ –

кольцевые напряжения в трубе от внутреннего давления газа, принимаются по формуле (17) из [4]; $\delta_n = 0,0105 \text{ м}$ – номинальная толщина стенки трубы; $n = 1,1$ – коэффициент надежности по нагрузке от внутреннего рабочего давления газа по табл. 13* [4]; $p = 4,5 \text{ МПа}$ – рабочее давление газа; $D_{\text{вн}} = 0,999 \text{ м}$ – внутренний диаметр трубы.

3. По формуле (18) из [4] определены продольные осевые напряжения в трубе от расчетных нагрузок и воздействий:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{пп, N}} &= -\alpha \cdot E \cdot \Delta t + \mu \cdot \frac{n \cdot p \cdot D_{\text{вн}}}{2 \cdot \delta_n} = \\ &= -0,000012 \cdot 206000 \cdot (-80) + \\ &\quad + 0,3 \cdot \frac{1,1 \cdot 4,5 \cdot 0,999}{2 \cdot 0,0105} = 68,4 \text{ МПа} \end{aligned}$$

где $\alpha = 0,000012$ – коэффициент температурного расширения для стали; $E=206000 \text{ МПа}$ – модуль

упругости для стали (в запас несущей способности принимаем, что трубопровод работает в упругой стадии); $\mu=0,3$ – коэффициент поперечной деформации для стали, работающей в упругой стадии;

$$\Delta t = -\frac{R_1(1-\mu)}{\alpha \cdot E} = -\frac{278,7 \cdot (1-0,3)}{0,000012 \cdot 206000} = -80^\circ\text{C} -$$

отрицательный температурный перепад при охлаждении газопровода, по формуле (24) из [4].

4. Определен резерв несущей способности трубопровода, как разница напряжений между $\psi_2 R_1$ и $\sigma_{\text{пп, N}}$ (см. формулу 15 [4]). Этот резерв может пойти на сопротивление сейсмическим воздействиям. Таким образом, максимальные продольные напряжения от сейсмической нагрузки могут быть записаны в следующем виде:

$$\sigma_{\text{сейсм}} = \psi_2 R_1 - |\sigma_{\text{пп, N}}| = 1,0 \cdot 278,7 - 268,4 = 10,3$$

МПа.

При определении максимально допустимых напряжений от взрывных сейсмических воздействий использован наиболее неблагоприятный случай с отрицательным температурным перепадом, вызывающим появление в трубопроводе растягивающих продольных напряжений.

При положительном температурном перепаде $\Delta t = \frac{R_1 \mu}{\alpha E} = \frac{278,7 \cdot 0,3}{0,000012 \cdot 206000} = +30^\circ\text{C}$ продольные напряжения оказались меньше:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{пп, N}} &= -\alpha \cdot E \cdot \Delta t + \mu \cdot \frac{n \cdot p \cdot D_{\text{вн}}}{2 \cdot \delta_n} = \\ &= -0,000012 \cdot 206000 \cdot 30 + 0,3 \cdot \frac{1,1 \cdot 4,5 \cdot 0,999}{2 \cdot 0,0105} = -3,5 \text{ МПа} \end{aligned}$$

Соответственно и разница напряжений оказалась больше $\sigma_{\text{сейсм}} = \psi_2 \cdot R_1 - |\sigma_{\text{пп, N}}| = 0,259 \cdot 278,7 - 3,5 = 68,7 \text{ МПа}$.

5. В запас несущей способности считаем, что трубопровод деформируется совместно с грунтом, в котором он проложен. В этом случае можно связать деформации грунтового массива с параметрами колебаний грунта. Именно такой подход использован в [7]. Максимально допускаемые в трубопроводе продольные напряжения могут быть записаны, как $\sigma_{\text{сейсм}} = \varepsilon \cdot E$, где ε – деформации трубы (или грунтового массива). Отсюда предельно допустимые деформации массива от сейсмического действия равны

$$\varepsilon = \frac{\sigma_{\text{сейсм}}}{E} = \frac{10,3}{206000} = 0,00005.$$

6. С другой стороны согласно [7] максимальные деформации грунта ε могут быть разделены на продольные ε_p и изгибные ε_s составляющие:

$$\varepsilon = \varepsilon_p + \varepsilon_s ; \varepsilon_p = \frac{v}{c_p} = 0,001452 \cdot v$$

где $c_p = 1,45 \cdot c_s = 1,45 \cdot 475 = 688,8 \text{ м/с}$ – скорость продольных волн в глинистых грунтах, глинах,

супесях согласно табл. 1 [8], причем $c_s=475$ м/с – средняя скорость поперечных волн в грунтах того же типа, табл. 1 [8].

$$\varepsilon_s = \frac{v \cdot 2 \cdot \pi f_0 \frac{D_h}{2}}{\frac{c_s^2}{2}} = \frac{v \cdot 2 \cdot \pi \cdot 25 \cdot \frac{1,02}{2}}{688,8^2} = 0,003551 \cdot v,$$

где $f_0=25$ Гц – максимальная доминирующая частота колебаний, определенная по серии взрывов; $D_h=1.02$ м – наружный диаметр трубы.

В обеих формулах v – пикивая скорость колебаний грунтового массива, м/с.

Особо следует отметить учет в деформациях трубопровода изгибной составляющей. В расчетах на сейсмические воздействия природного происхождения изгибные деформации не учитываются. Это связано с низкой доминирующей частотой природных воздействий и соответственно с большой длиной сейсмических волн. При взрывных воздействиях частота колебаний достаточно высока, а длина волны существенно меньше, что ведет к необходимости учета изгибных деформаций.

Таким образом, можно связать предельно допустимые деформации грунтового массива с пикивой скоростью колебаний:

$$0.00005 = (0.001453 + 0.003551)v,$$

откуда можно найти предельно допустимые пикиевые скорости колебаний. В нашем случае они составили 0,028 м/с.

Полученное значение почти в четыре раза меньше значения предельно допустимой скорости

колебаний по [3], равной 5 дюймам/с (127 мм/с) и на 44% меньше предельно допустимых значений по условиям нефтегазовой компании Chevron (США).

Учитывая неопределенность с коррозионным износом стенок трубопровода, а также влияние возможных дефектов сварных швов и т.д. предельно допустимая скорость колебаний была ограничена величиной $[v] = 20$ мм/с.

После установления предельно допустимой скорости колебаний, используя выражение для верхней границы доверительного интервала, можно получить предельно допустимое приведенное расстояние. В нашем случае оно составило 54,34 м/кг^{1/3}.

По полученному приведенному расстоянию, зная фактическое расстояние от взрываемого блока до газопровода можно получить максимально допустимую массу ВВ в условной группе зарядов. Так, например, для расстояния до газопровода в 400 м предельно допустимая масса ВВ в любом 20-мс скользящем окне не должна превышать 399 кг в тротиловом эквиваленте.

Таким образом, разработанная методика определения сейсмобезопасных расстояний позволяет адекватно оценить сейсмическую безопасность подземного газопровода при ведении массовых взрывов. При этом методика адаптирует положения нормативных документов к особенностям сейсмических воздействий промышленных взрывов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Единые правила безопасности при взрывных работах (ПБ 13-407-01). – М.: ГУП «НТЦ «Промышленная безопасность», 2002. – 248 с.
2. Рекомендации по технологии производства взрывных работ в мерзлых и скальных грунтах при сооружении магистральных трубопроводов параллельно действующим стальным подземным трубопроводам (Р 442-81). – М.: ВНИИСТ, 1982.–26 с.
3. Siskind D.E. Surface Mine Blasting Near Pressurized Transmission Pipelines / D.E. Siskind, M.S. Stagg, J.E. Wiegand, D.L. Schultz // RI 9523, Bureau of mines, US Dept of Interior, 1994. - 148 р.
4. СНиП 2.05.06-85* Магистральные трубопроводы. М.: ФГУП ЦПП, 2008.
5. СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах. М.: ФГУП ЦПП, 2009.
6. Новиньков А.Г. Оценка сейсмобезопасности промышленных взрывов / А. Г. Новиньков, С. И. Протасов, А. С. Гукин // Безопасность труда в промышленности. – 2013. – №6. – С.40-46.
7. Dowding Ch. H. Blast Vibration Monitoring and Control, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1985. - 297 р.
8. СП 14.13330-2011. Свод правил. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. – М., 2010. – 82 с.

□ Авторы статьи:

Новиньков
Алексей Геннадьевич ,
канд.техн.наук, доцент
каф. «Строительные кон-
струкции, водоснабжение
и водоотведение» КузГТУ,
Email:novinkova@mail.ru

Протасов
Сергей Иванович,
канд.техн.наук, профессор
каф. «Открытые горные
работы» КузГТУ, директор
НФ «КУЗБАСС-НИИОГР»,
Email:psi.rmpio@kuzstu.ru

Самусев
Павел Александрович,
канд.техн.наук, зав. каф.
«Открытые горные рабо-
ты» КузГТУ.
Тел. 3842- 39-63-68

Гукин
Андрей Сергеевич,
аспирант каф.
«Открытые горные рабо-
ты» КузГТУ
Тел. 3842- 39-63-68