

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ НА КАРЬЕРАХ

С.Н. Жариков, В.А. Кутуев

Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург

Аннотация. В статье представлены результаты исследований сейсмического воздействия взрывов на охраняемые объекты и законтурный массив в условиях разработки различных сложноструктурных месторождений с использованием прямых натуральных измерений на различных месторождениях Урала, Сибири, Карелии и Казахстана. Проанализированы фактические колебания массива горных пород и установлены их отклонения от расчётных значений для разных грунтовых условий, а также получены уточняющие зависимости по расчёту допустимых скоростей колебаний, основанные на данных о физико-механических свойствах горных пород со структурным ослаблением массива в интервале 0,05... 0,1. На основе этих данных разработан экспресс-метод, который позволяет оперативно подобрать сейсмобезопасные параметры взрывных работ (ВР) в приконтурной зоне карьера, и прогнозировать воздействие ВР на охраняемые объекты.

Ключевые слова: скорость колебаний массива горных пород, сейсмическое воздействие, взрывные работы, структурное ослабление массива, прочностные характеристики пород.

Введение

Буровзрывные работы (БВР) на сегодняшний день являются самым экономичным способом разрушения значительных объемов горных пород. Как известно, для поддержания нормальной деятельности выстроенных городских агломераций требуется регулярное потребление ресурсов, а значит и добывать полезные ископаемые в ближайшем будущем необходимо примерно в тех же масштабах и, возможно, с небольшими изменениями, связанными с кризисными явлениями различного рода. Соответственно, объемы разрушения горных пород с использованием энергии взрыва для последующих выемочных работ и дальнейшего транспортирования на земную поверхность останутся прежними во времени. Следует также заострить особое внимание на том, что открытые и подземные горные выработки продвигаются постепенно в глубину, то есть последствия от взрывных работ становятся более опасными и могут спровоцировать крупные обрушения, обвалы и оползни. При производстве технологических взрывов безопасность охраняемых объектов обеспечивается соблюдением трёх основных ограничивающих критериев: сейсмическое воздействие (сейсмика) [1-7]; разлет отдельностей; степень возможного повреждения защищаемого объекта ударной волной. Сейсмика оказывает влияние на межблочные подвижки, на устойчивое состояние откосов и грунтов, а также и на сооружения, претерпевающие в своем основании гармонические колебания. Сейсмическое воздействие технологических взрывов на устойчивость охраняемого объекта не сразу можно заметить, но точно известно, что оно приводит к изменению свойств массива.

Самыми опасными для каждого охраняемого объекта являются колебания, превышающие допустимые по критерию устойчивости, поэтому важным вопросом промышленной безопасности является контроль таких колебаний при производстве взрывных работ, которые обеспечили бы сохранность или хотя бы минимальное негативное воздействие на объект при производстве взрывов. Учитывая изложенное, следует отметить актуальность исследований в направлении изучения сейсмических волн, а привязка этих исследований к задачам горной промышленности имеет высокое научно-практическое значение.

Цель исследований

Изучение распространения в горном массиве волновых процессов для повышения уровня безопасности охраняемых объектов, промышленной безопасности горного производства и рационального освоения прибортовых запасов минерального сырья при разработке месторождений открытым способом.

Задачи исследований

Определить средние отклонения расчетных значений колебаний массива горных пород от колебаний, полученных при натурных измерениях для различных грунтовых условий.

Определить значения переводного коэффициента для расчета допустимых скоростей колебаний на основе свойств горных пород и структурного ослабления массива.

Разработать экспресс-метод (номограмму) для определения допустимой сейсмической нагрузки, действующей на охраняемые объекты.

Методология исследований

При выполнении исследований применялись методы: математической статистики, моделирования, анализа, синтеза и натурных экспериментов. При установлении отклонений фактических колебаний массива горных пород (экспериментальные данные) от расчетных значений для разных грунтовых условий, а также получении уточненных выражений по определению допустимых скоростей колебаний при различном структурном ослаблении массива горных пород, использовалось математическое моделирование. На основе анализа данных о свойствах горных пород с последующим моделированием разработан экспресс-метод для определения допустимого сейсмической нагрузки на охраняемые объекты.

Результаты исследований и обсуждение

Проведение нами и другими сотрудниками лаборатории РГП ИГД УрО РАН (Меньшиков П.В., Берсенев Г.П., Флягин А.С.) значительного количества работ за период 2005-2021 гг. на различных месторождениях Урала, Сибири, Карелии и Казахстана по измерениям сейсмического действия взрывов показало, что получаемые данные в большинстве случаев меньше допустимых значений, что говорит о грамотной организации взрывных работ на ряде предприятий, где производились измерения. Однако превышение допустимых значений на других объектах заставило разбираться в этом. И в ряде случаев выяснилось, что ограничения параметров в принципе предполагали некий запас и щадящее воздействие, а фактически наблюдались превышения колебаний. При изучении геологических материалов по месторождениям и проведении анализа технологических приёмов производства установлено, что возможны значительные отклонения колебаний от расчётных величин, непосредственно связанные со структурой залегания горных пород. Полученная нами усредненная зависимость отклонения фактической от расчётной скорости колебаний для грунтовых условий в диапазоне $K=200\ldots 600$ приведена на рисунке 1.

В соответствии с методикой Картузова М.И. [8] для различных значений коэффициента грунтовых условий (K) нами были получены следующие средние отклонения, представленные на рисунке 2.

Сопоставив полученные результаты моделирования с геологическими данными по методике ИГД УрО РАН, алгоритм действий которой представлен на рисунке 3, мы получили возможность уточнить значение переводного коэффициента для вычисления допустимой скорости сейсмических колебаний в массиве горных пород с различным структурным ослаблением ($\lambda=0,1$; $\lambda=0,066$; $\lambda=0,05$). Для этого были построены три зависимости, представленные на рисунке 4 (а, б, в) [9].

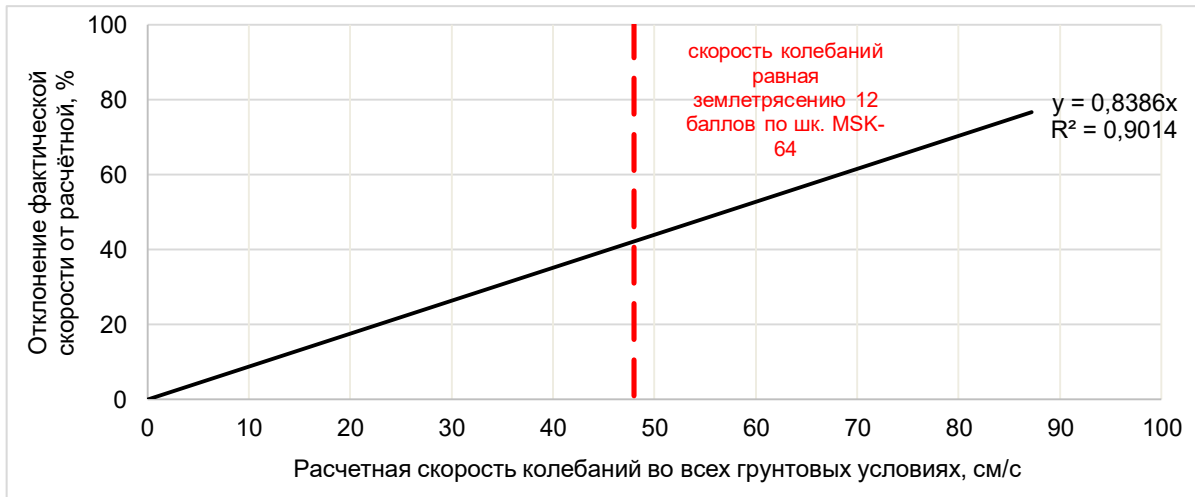


Рис. 1. Зависимость отклонения фактической скорости колебаний от расчетной величины в различных грунтовых условиях

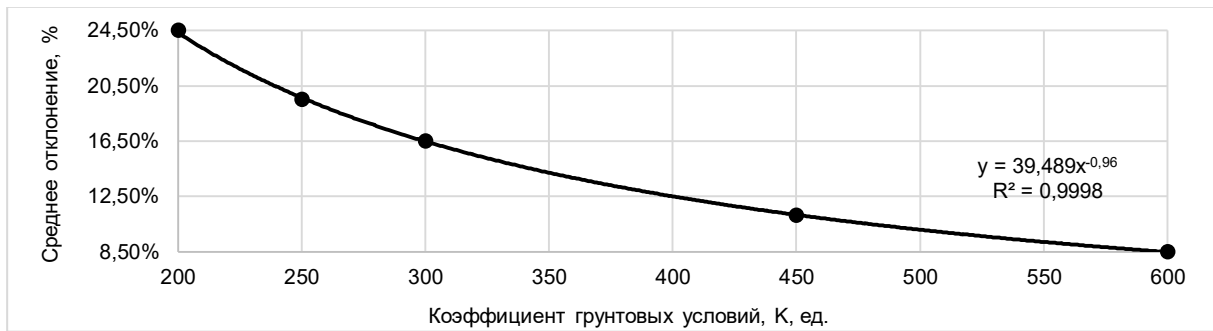


Рис. 2. Отклонения фактической скорости колебаний от расчетной для разных коэффициентов грунтовых условий

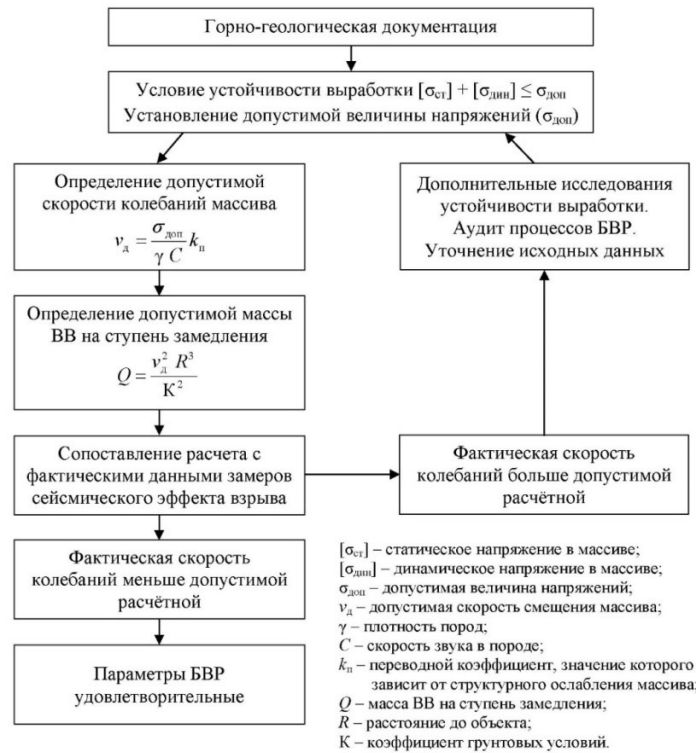


Рис. 3. Схема изучения и анализа сейсмичности взрывов [10]

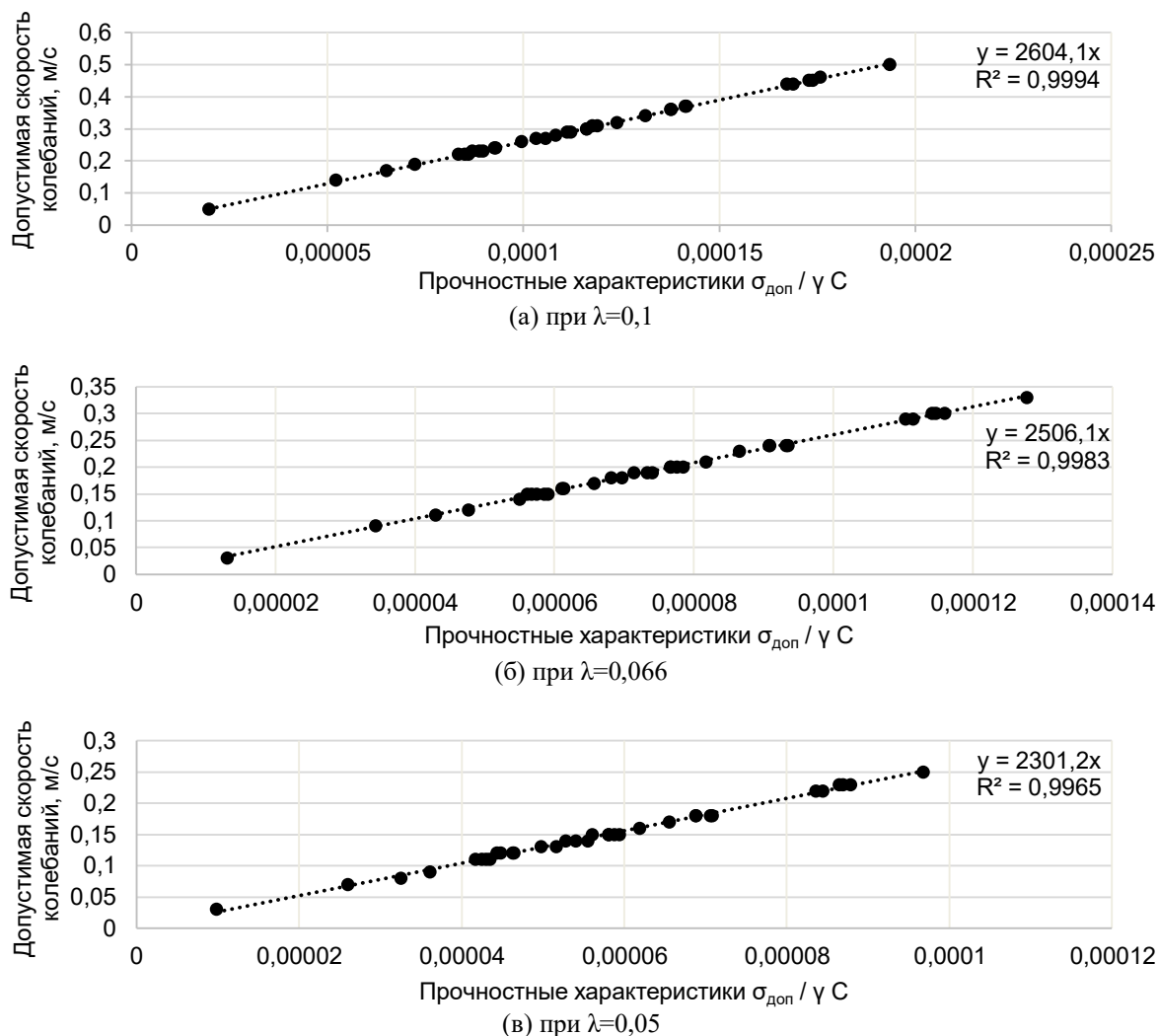


Рис. 4. Взаимосвязь прочностных характеристик горных пород и допустимой скорости колебаний при разных коэффициентах структурного ослабления

На полученных зависимостях (рис. 4) прочностные характеристики массива горных пород представлены в виде следующего соотношения [11]: *прочностные характеристики* $= \frac{\sigma_{\text{доп}}}{\gamma C}$, где $\sigma_{\text{доп}}$ – допустимая величина напряжений, МПа; γ – плотность пород, т/м³; C – скорость звука в породе, м/с.

В приближении за допустимую величину напряжений $\sigma_{\text{доп}}$ можно принимать статический предел прочности пород на растяжение (σ_p) в массиве, увеличенный на 10-30%. Следует отметить, что σ_p , определённый в образце, существенно отличается от значения в массиве ввиду макронарушений. В массиве σ_p определяется коэффициентом структурного ослабления λ [10].

Детальное изучение причин отклонений привело к оценке структурных особенностей залегания горных пород и позволило выразить зависимость допустимой скорости сейсмических колебаний от прочностных характеристик массива при различном структурном ослаблении. По результатам моделирования (рис. 4) нами были получены уточненные переводные коэффициенты k_n для трех коэффициентов λ (выражения (1)-(3)):

$$v_d = \frac{\sigma_{\text{доп}}}{\gamma C} 2604,1 \quad (\text{при } \lambda=0,1); \quad (1)$$

$$v_d = \frac{\sigma_{\text{доп}}}{\gamma C} 2506,1 \quad (\text{при } \lambda=0,066); \quad (2)$$

$$v_d = \frac{\sigma_{\text{доп}}}{\gamma C} 2301,2 \quad (\text{при } \lambda=0,05). \quad (3)$$

Как видно из выражений (1)-(3), разница между полученными зависимостями не велика и составляет около 12% в диапазоне значений $\lambda=0,05... 0,1$, но и сам коэффициент структурного ослабления на данный момент является не строго определяемой величиной, т.к. пока не существует методов для точного описания состояния горного массива, поэтому его значение устанавливается в приближении. При этом в последнее время начинают развиваться методы исследования трещиноватости горных пород [12-14], то есть снижается трудоемкость исследований, а значит в ближайшем будущем станет проще производить оценку структурной неоднородности массива горных пород. В настоящее время имеющиеся общие зависимости без учета структуры массива, либо с представлением его как некоторой усредненной однородной среды, ведут к отклонениям фактических и расчетных значений. В части сейсмических колебаний данный факт следует рассматривать как временно приемлемый потому, что чем глубже горные работы, тем опаснее может быть выражена неточность расчетов. С этой точки зрения становится ясным, что зависимости, уточняющие протекание процесса в различных структурах, необходимо устанавливать на основе экспериментальных данных.

Следующим этапом исследований стала разработка экспресс-метода для оценки и прогнозирования сейсмического воздействия взрывных работ на охраняемые объекты, основанных на данных о свойствах горных пород [15-20], выражающих всю ту изменчивость состояния массива в естественном залегании, с которой имеют дело горные инженеры при организации и ведении процессов открытой разработки полезных ископаемых. В данной работе не учитывались детонационные характеристики конкретного ВВ и не уточнялся импульс, передаваемый взрывом массиву горных пород, рассматривалась исключительно масса заряда. Хотя реакция нарушенного массива в зависимости от нагрузки может быть разной на прохождение волн различной мощности. Но для обобщения полученных данных и установления взаимосвязи значений использование общего подхода является наиболее целесообразным, а формульную часть в будущем всегда можно уточнить. Тем более, что некоторые погрешности уже уточнены в процессе построения номограммы. На основе данных о свойствах горных пород и допустимых скоростях сейсмических колебаний с учетом поправочных коэффициентов, зависящих от структурного ослабления массива горных пород, получена номограмма, представленная на рисунке 5.

Разработанный экспресс-метод при известной скорости распространения продольной волны в массиве горных пород и возможном коэффициенте структурного ослабления ($\lambda=0,05... 0,1$) позволяет определить:

- допустимую сейсмическую нагрузку, оказываемую на массив горных пород в естественном залегании, определяющую сейсмоустойчивость основания охраняемого объекта (красная пунктирная линия на рисунке 5);

- безопасную массу ВВ в ступени замедления в зависимости от грунтовых условий ($K=200... 650$) и удаления охраняемого объекта от эпицентра взрыва (голубая пунктирная линия на рисунке 5);

- радиусы упругой зоны и зоны сдвиговых деформаций, за которой исключены деформации (коричневая и зеленая пунктирные линии на рисунке 5 соответственно);
- размеры зоны трещинообразования в массиве в зависимости от массы зарядов ВВ инициируемых одновременно (лиловая пунктирная линия на рисунке 5).

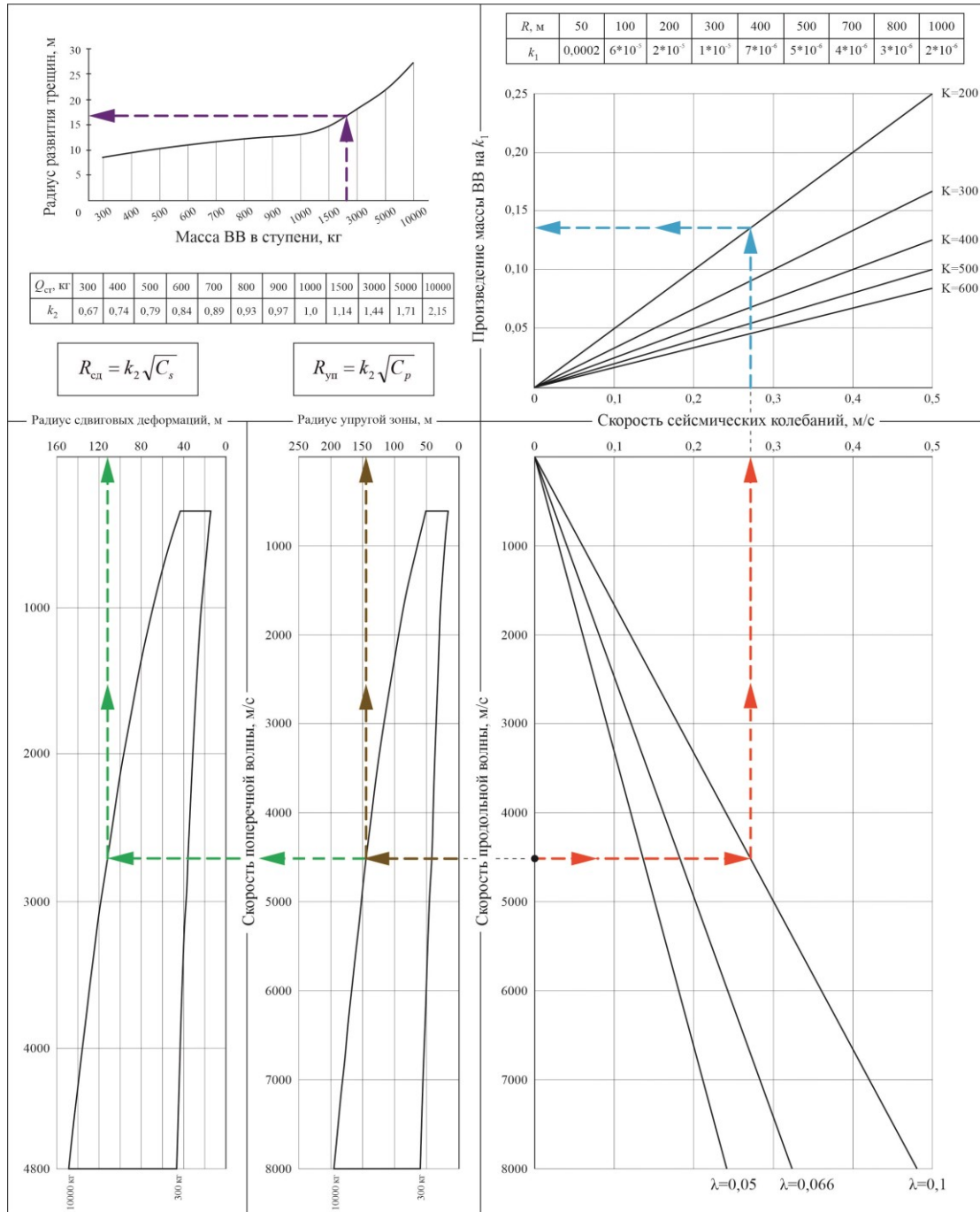


Рис. 5. Экспресс-метод (номограмма) для прогнозирования допустимого сейсмического воздействия [15]

Выводы

В процессе анализа данных натуральных измерений сейсмике взрывов на разных месторождениях установлены средние отклонения фактических колебаний от расчетных значений при грунтовых условиях в интервале $\lambda=0,05... 0,5$. Средние от-

клонения составили от 8,5 до 24,5% (при $K=650 \dots 200$, соответственно). На их основе получены переводные коэффициенты для расчета допустимых скоростей колебаний в зависимости от свойств горных пород при различном структурном ослаблении массива.

По данным о свойствах пород, слагающих горный массив, и информации о распространении в них сейсмических колебаний от взрывных работ разработан экспресс-метод (номограмма) для обеспечения сейсмобезопасности охраняемых объектов и оперативной оценки последствий взрывов, а также установления зоны техногенного нарушения.

В дальнейших исследованиях для совершенствования разработанного экспресс-метода следует уточнять взаимосвязь допустимой скорости сейсмических колебаний со структурной неоднородностью пород в массиве. Для этого требуется соответствующее развитие экспресс-методов по определению свойств горных пород в естественном залегании.

Исследования выполнены в рамках Государственного задания №075-00412-22 ПР, темы 1 (2022-2024): Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горнотехнических систем (FUWE-2022-0005), рег. №1021062010531-8-1.5.1, а также при дополнительном привлечении хоздоговорных средств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сейсмическая безопасность при взрывных работах: учеб. пособие / В.К. Совмен [и др.]. – М.: Горная книга, 2012. – 228 с.: ил.
2. Адушкин В.В., Соловьев С.П. Генерация электрического и магнитного поля при воздушных, наземных и подземных взрывах // Физика горения и взрыва. – 2004. – Т. 40, № 6. – С. 42-51.
3. Садовский М.А. Избранные труды: геофизика и физика взрыва. – М.: Наука, 2004. – 439 с.: ил.
4. Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока / под ред. В.Е. Фортова. – М.: Наука, 2002. – 397 с.: ил.
5. Орленко Л.П. Физика взрыва и удара: учеб. пособие для вузов. – М.: Физматлит, 2006. – 304 с.: ил.
6. Мосинец В.Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах. – М.: Недра, 1976. – 271 с.: ил.
7. Адушкин В.В., Спивак А.А. Геомеханика крупномасштабных взрывов. – М.: Недра, 1993. – 318 с.: ил.
8. Картузов М.И., Паздников Н.В. Методика обеспечения сейсмобезопасной технологии ведения взрывных работ. – Свердловск: ИГД МЧМ СССР, 1984. – 12 с.
9. Жариков С.Н., Кутуев В.А. Анализ сейсмического эффекта в различных породах и грунтовых условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 12. – С. 44-53. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-44-53.
10. Kutuev V.A., Zharikov S.N. Study of permissible dynamic load on high-pressure gas pipe laying site in connection with blasting operations during open-pit mining // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – V. 773, № 1. – Номер статьи: 012089. – DOI: 10.1088/1755-1315/773/1/012089.
11. Zharikov S.N., Kutuev V.A. Impact of blasting on pit wall rock mass // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – V. 773, № 1. – Номер статьи: 012060. – DOI: 10.1088/1755-1315/773/1/012060.
12. Ольховатенко В.Е., Трофимова Г.И., Ожогина Т.В. Методы изучения трещиноватости горных пород: учеб.-метод. пособие. – Томск: Изд-во Том. Гос. архит.-строит. ун-та, 2015. – 80 с.
13. Гик Л.Д. Методы изучения трещин и пор горных пород на основе данных акустического каротажа // Физическая мезомеханика. – 2008. – Т. 11, № 4. – С. 67-73.
14. Симоненко Е.П., Долгирев С.С., Кириченко Ю.В. Возможности методов ГИС для изучения трещиноватости // Георесурсы. – 2018. – Т.20, № 3. – С. 267-273. – DOI: 10.18599/grs.2018.3.267-273.
15. Жариков С.Н., Кутуев В.А. Построение номограммы для определения параметров БВР в приконтурной зоне карьера // Изв. Тульского гос. ун-та. Науки о Земле. – 2020. – № 3. – С. 161-171. – DOI: 10.25635/r0915-0037-0746-z.

16. Распределение и корреляция показателей физических свойств горных пород: справ. пособие / [М.М. Протодяконов, Р.И. Тедер, Е.И. Ильницкая и др.] под ред. Н.В. Мельникова. – М.: Недра, 1981. – 190 с.: ил.
17. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород / [сост. М.М. Протодяконов, Е.И. Ильницкая, Р.И. Тедер и др.; под ред. Н.В. Мельникова]. – М.: Недра, 1975. – 279 с.
18. Новик Г.Я., Ржевский В.В. Основы физики горных пород. – М.: Недра, 1984. – 359 с.
19. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых: (Петрофизика). Справ. геофизика / под ред. Н.Б. Дортман. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, – 1984. – 455 с.: ил.
20. Открытые горные работы: справочник / Трубецкой К.Н. и др. – М.: Горное бюро, 1994. – 590 с.

УДК 622.831.322

DOI:10.7242/echo.2022.3.11

ОЦЕНКА ГАЗОНОСНОСТИ СОЛЯНЫХ ПОРОД ПО КЕРНОВОМУ МАТЕРИАЛУ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН ВОСТОЧНО-ТАЛИЦКОГО УЧАСТКА ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ СОЛЕЙ

О.В. Иванов

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация. Лабораторные исследования по оценке газоносности пород по связанным газам образцов керна из геологоразведочных скважин, пробуренных в пределах Восточно-Талицкого участка, проводились методом сухой механической дезинтеграции при постоянном контроле температуры и давления в размольном стакане, а также с применением хроматографического анализа компонентного состава выделившихся из пород связанных газов. Представлены предварительные результаты по двум геологоразведочным скважинам.

Ключевые слова: калийно-магниевые соли, каменная соль, газоносность пород, связанные газы, размол, геологоразведочные скважины, компонентный состав, газовый хроматограф.

Введение

При ведении геологоразведочных работ на Восточно-Талицком участке Верхнекамского месторождения калийных солей необходима предварительная оценка газоносности соляных пород. Настоящие исследования основываются на результатах определения газоносности соляных пород по связанным газам, которая, как известно, составляет порядка 10% от полной газоносности. При вскрытии и подготовке данного участка на основе проведенных исследований возможна корректировка объемов и параметров профилактических мероприятий для предотвращения газодинамических явлений.

Методика проведения исследований

Комплекс оборудования для определения газоносности горных пород по связанным газам состоит из щековой дробилки ВВ 51, планетарной шаровой мельницы РМ 100 и контрольно-измерительной системы РМ GrindControl компании Retsch. Порядок работы следующий [1-2]. Образцы пород размером 35 мм с помощью щековой дробилки ВВ 51 размалываются до 10 мм. 300 мл подготовленного материала вместе с двадцатью мелющими шарами из нержавеющей стали диаметром 20 мм загружается в размольный стакан планетарной шаровой мельницы РМ 100, на который герметично устанавливается специальная крышка с системой РМGrindControl. Размол образцов породы происходит в заданном режиме: устанавливается скорость вращения и длительность измельчения. При этом данные о давлении и температуре в размольном стакане передаются системой РМGrindControl на персо-