

DOI: 10.25558/VOSTNII.2019.13.3.003

УДК 622.235

© А.Г. Новиньков, С.И. Протасов, П.А. Самусев, 2019

А.Г. НОВИНЬКОВ

канд. техн. наук, доцент,
заведующий сектором экспертизы
зданий и сооружений
Новационная фирма «КУЗБАСС-НИИОГР»,
г. Кемерово
e-mail: firma@kuzbass-niiogr.ru



С.И. ПРОТАСОВ

канд. техн. наук, профессор,
директор
Новационная фирма «КУЗБАСС-НИИОГР»,
г. Кемерово
e-mail: protasov@kuzbass-niiogr.ru



П.А. САМУСЕВ

канд. техн. наук, доцент,
технический эксперт
Новационная фирма «КУЗБАСС-НИИОГР»,
г. Кемерово
e-mail: firma@kuzbass-niiogr.ru



ОПЫТ УПРАВЛЕНИЯ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТЬЮ МАССОВЫХ ВЗРЫВОВ

Одним из опасных факторов, проявляющихся при ведении взрывных работ, является сейсмическое действие взрыва. Опасность сейсмического действия проявляется в виде риска появления в охраняемых зданиях и сооружениях повреждений различного вида. Для обеспечения сейсмической безопасности при взрывных работах необходимо правильно прогнозировать пиковую скорость колебаний земной поверхности. В статье подробно рассмотрены подходы обеспечения прогноза пиковых скоростей колебаний с требуемым уровнем надежности.

Ключевые слова: МАССОВЫЕ ВЗРЫВЫ, СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТЬ МАССОВЫХ ВЗРЫВОВ, СЕЙСМИКА ВЗРЫВНЫХ РАБОТ, ВЗРЫВНЫЕ РАБОТЫ, СЕЙСМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВА, РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ.

Введение

Новационная фирма «КУЗБАСС-НИИОГР» занимается вопросами сейсмической безопасности при массовых промышленных взрывах более 20 лет. За этот период накоплен опыт работы с десятками угле- и горнодобывающих предприятий Кузбасса, Новосибирской области и Краснояр-

ского края. В рамках работ по обеспечению сейсмической безопасности записаны и обработаны более 10 тысяч трехкомпонентных сейсмограмм, полученных в самых различных горно-геологических условиях практически при всех видах взрывных работ, в том числе и с использованием электронных средств инициирования, с использованием замедле-

ний между зарядами даже в пределах одной скважины, при взрывании блоков с суммарной массой взрывчатых веществ более килотонны, при ведении взрывных работ вблизи зданий жилого и социального назначения, ответственных трубопроводов, газопроводов, гидротехнических сооружений и подземных горных выработок.

Методические подходы к обоснованию сейсмобезопасных параметров взрывных работ

На ранних стадиях наших исследований было опробовано множество различных подходов и методик по прогнозированию сейсмической безопасности. От большинства из них по тем или иным причинам пришлось отказаться. Основная причина отказа — слабая связь между полученными результатами расчета и наблюдаемыми экспериментальными сейсмическими эффектами. На наш взгляд, причина кроется в том, что расчетные подходы в этих методиках разрабатывались с использованием ограниченного объема исходных данных, притом, что предлагались к использованию в любых условиях, при любых технологиях ведения взрывных работ. Реальность заставила нас разработать собственные методические подходы к обеспечению сейсмической безопасности, которые были бы лишены этих недостатков. Такие подходы, как нам видится, оказались достаточно успешными, что подтверждается многолетней практикой работы в самых сложных условиях.

Кузбасс является лидером в масштабах России по объемам использования взрывчатых веществ в промышленности. При этом лидерство по объемам взрывных работ в угольной и горнодобывающей промышленности региона сопряжено с большим числом особенностей, которые приходится учитывать при ведении массовых взрывов, проявляющиеся наиболее сильно именно в Кузбассе. Основные особенности ведения взрывных работ в условиях Кузбасса:

- Кузбасс — это высоко урбанизированный регион (взрывные работы ведутся в не-

посредственной близости от крупных населенных пунктов);

- широкое использование новых технологий взрывания (электронные системы взрывания, рассредоточение заряда внутри скважины с использованием внутрискважинных замедлений между частями заряда, новые типы ВВ и т. д.);

- совмещенные технологии добычи (открытые работы часто ведутся над подземными выработками или вблизи с ними);

- взрывные работы ведутся вблизи магистральных газопроводов, водоводов, гидротехнических сооружений и подобных опасных объектов.

Нормативные документы часто не успевают откликаться на изменение технологий взрывания и не учитывают особенности ведения взрывных работ в различных условиях, поэтому требуются научно обоснованные и, самое главное, подтвержденные практикой производственного применения методы обоснования сейсмической безопасности массовых взрывов.

Используемые Новационной фирмой «КУЗБАСС-НИИОГР» собственные методические подходы характеризуются следующими отличительными чертами. Прежде всего мы стараемся максимально, насколько это возможно, использовать действующие нормативные документы как в области промышленной безопасности, так и в области строительства. Это не только Федеральные нормы и правила в области взрывных работ [1], российские ГОСТы на вибрацию зданий [2], строительные Своды Правил, но также и нормативные документы США, Великобритании, Германии [3–5].

Вторая особенность носит принципиальный характер — все оценки сейсмической безопасности делаются исключительно на основе экспериментальных данных, полученных для конкретного горного предприятия, для конкретной технологии ведения взрывных работ. Такой подход позволяет автоматически учесть все особенности горно-геологических условий на пути распространения сейсмических волн от границы взрываемого блока до защищаемого объекта.

Также мы используем вероятностный подход к оценке сейсмической безопасности. Так, например, мы прогнозируем пиковые скорости колебаний с заданной вероятностью превышения. В соответствии с нормативными документами эта вероятность для зданий и наземных сооружений принимается равной 95 %. То есть только в 5 % случаев могут наблюдаться превышения пиковой скорости колебаний, которые потенциально могут привести к легким и косметическим повреждениям в виде появления тонких трещин в штукатурке, осыпания побелки и т. п. Для временных сооружений эта вероятность может быть понижена до 90 %, а для особо ответственных сооружений, наоборот, может быть повышена до 98 %. То есть мы можем регулировать надежность прогноза.

Наконец, обязательным этапом оценки сейсмической безопасности является оценка достоверности прогноза. Для этого используются соответствующий математический аппарат. Для тех, кто занимается сейсмической безопасностью при горных взрывах, не является секретом, что используемые методы прогноза построены на идеализированных математических моделях. Наблюденные экспериментальные результаты часто не вписываются в расчетные предпосылки. Для таких случаев нами разработаны алгоритмы действий, которые позволяют скорректировать расчетные модели и тем самым повысить надежность прогноза. И последняя особенность подходов Новационной фирмы «КУЗБАСС-НИИОГР» состоит в том, что они являются универсальными и могут применяться не только для поверхностных объектов, но и для подземных горных выработок, трубопроводов, защитных дамб гидротехнических сооружений и т. д.

Пример прогноза пиковой скорости колебаний в зависимости от приведенного расстояния $R_{пр}$ на основе подходов Новационной фирмы «КУЗБАСС-НИИОГР» [6, 7] приведен на рис. 1.

Критерием сейсмической безопасности является выполнение условия $v \leq [v]$, где v — прогнозируемая скорость колебаний

подзащищаемым объектом, а $[v]$ — предельно допустимая скорость колебаний. Предельно допустимая скорость колебаний определяется по ГОСТ 52892-2007 [2], BS 7385-2:1993 [4], DIN 4150-3 [5] и др.

Таким образом, задача обеспечения сейсмической безопасности распадается на две подзадачи: прогнозирование пиковой скорости колебаний на заданном расстоянии от взрывающегося блока при заданных параметрах взрыва и на задачу определения предельно допустимой величины пиковой скорости колебаний для конкретных защищаемых объектов.

Задача прогноза пиковой скорости по облаку экспериментальных точек решается с использованием регрессионного анализа и метода наименьших квадратов. Результатом этого этапа является получение средней линии регрессии (на рис. 1 показана синим цветом). Затем с учетом заданной вероятности превышения и величины разброса экспериментальных точек относительно средней линии регрессии строится расчетная верхняя граница доверительного интервала (показана на рис. 1 красным цветом). И, наконец, по расчетной красной линии, зная предельно допустимые скорости колебаний можно перейти к предельно допустимой величине приведенного расстояния, и далее к предельно допустимой массе взрывчатого вещества в пределах скользящего 20-мс окна. Другими словами, если масса ВВ в серии не превысит полученной величины, то ожидаемая на заданном расстоянии пиковая скорость колебаний с вероятностью 95 % не превысит предельно допустимых нормативных уровней колебаний.

Вторая подзадача — установление предельно допустимых значений пиковых скоростей колебаний. Для зданий и большинства наземных сооружений пиковые скорости колебаний регулируются соответствующими ГОСТами и нормативными документами других стран. Однако даже в этом случае выбор соответствующего нормативного документа является нетривиальной задачей. Надо знать, для каких условий были разработаны эти нормативные документы. Например, нормы Великобритании разработаны на основе дан-

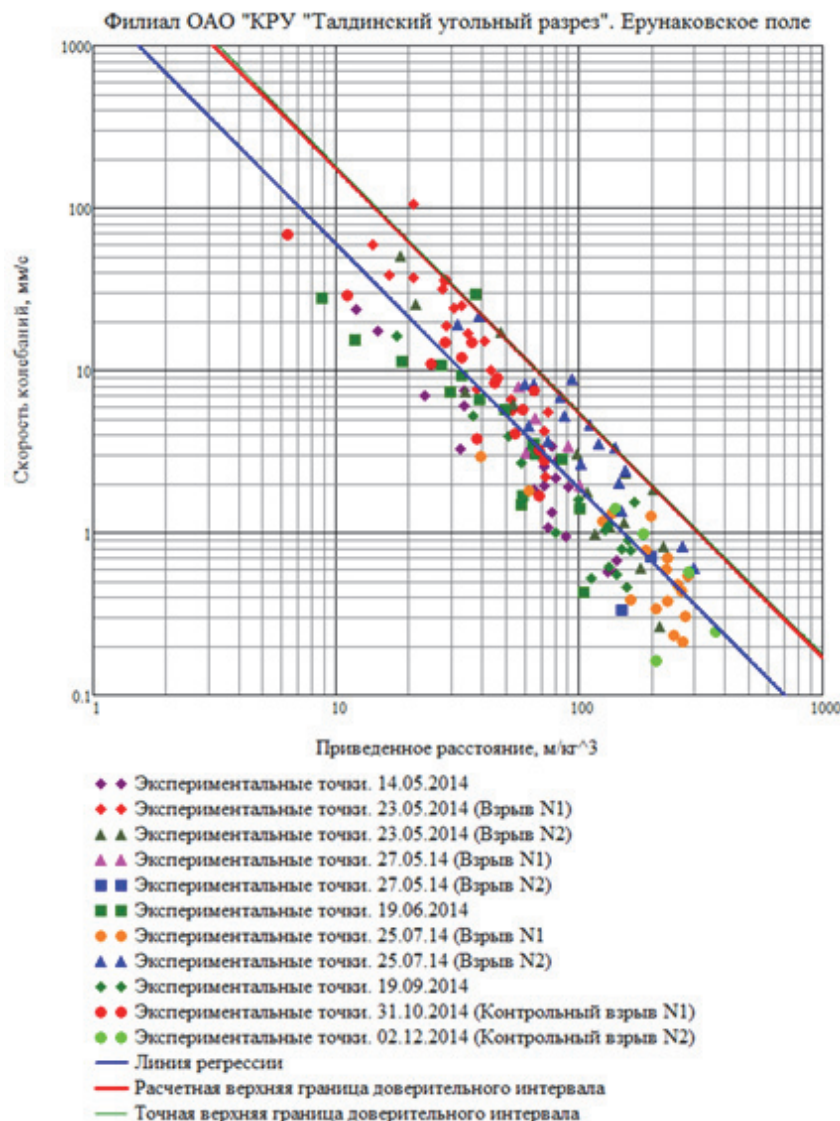


Рис. 1. Прогнозирование пиковой скорости колебаний.
 По оси абсцисс — приведенные расстояния: $R_{пр} = R/\sqrt[3]{Q}$.
 По оси ординат: v — пиковые скорости колебаний, мм/с

ных, полученных на карьерах строительной индустрии, а также частично с использованием результатов экспериментальных исследований с применением вибромашин относительно небольшой массы. Взрывы на карьерах строительной индустрии характеризуются более высокими доминирующими частотами колебаний, малой длительностью взрывов, что позволяет установить более высокие значения предельно допустимых скоростей воздействия на охраняемые объекты. Очевидно, что при использовании британских стандартов на угольных карьерах сейсмическая безопасность будет занижена.

Предельно допустимые скорости для подземных трубопроводов получены расчетом с

использованием строительных СП (Сводов Правил). Предельно допустимые значения пиковых скоростей для подземных горных выработок получены обработкой большого массива экспериментальных данных, содержащих подтвержденные сведения о случаях вывалов или шелушения кровли и боков выработок.

Требования к качеству и количеству экспериментальных данных

Поскольку методика базируется на анализе экспериментальных данных, то к качеству исходного экспериментального материала предъявляются достаточно жесткие требования. Для регистрации сейсмических коле-

баний используется парк геофонов InstanTel (канадского производства), а также несколько сейсморегистраторов во взрывозащищенном исполнении. Обычно для одного участка ОГР регистрируется 8–12 взрывов (в разных частях карьерного поля и на разных горизонтах), при этом для каждого взрыва записывается 8–13 трехкомпонентных сейсмограмм. Общее количество точек в анализируемом направлении распространения сейсмических волн для обычной достоверности прогноза (95 %) составляет не менее 70–80. Для каждой технологии взрывания и для каждого направления распространения сейсмических волн строится своя регрессия. В некоторых случаях, по результатам соответствующих статистических тестов, экспериментальные выборки для разных направлений распространения сейсмических волн могут быть объединены в одну общую выборку.

Такой, на первый взгляд, трудоемкий подход компенсируется очень высокой надежностью прогноза, поскольку в этом случае автоматически учитываются особенности формирования и распространения сейсмических волн на конкретной производственной площадке. В рамках временного периода, на который распространяются рекомендации по сейсмобезопасным параметрам взрывов, периодически ведутся контрольные замеры колебаний и их сравнение с расчетными оценками.

Резонно задать вопрос, а оправдывает ли себя такой трудоемкий подход, основанный на сборе и обработке экспериментальных данных? Можно ли ограничиться методиками, использующими справочные данные? Для ответа на этот вопрос приведем сравнительные результаты прогноза пиковых скоростей колебаний в условиях одного из крупных разрезов Кузбасса (рис. 2).

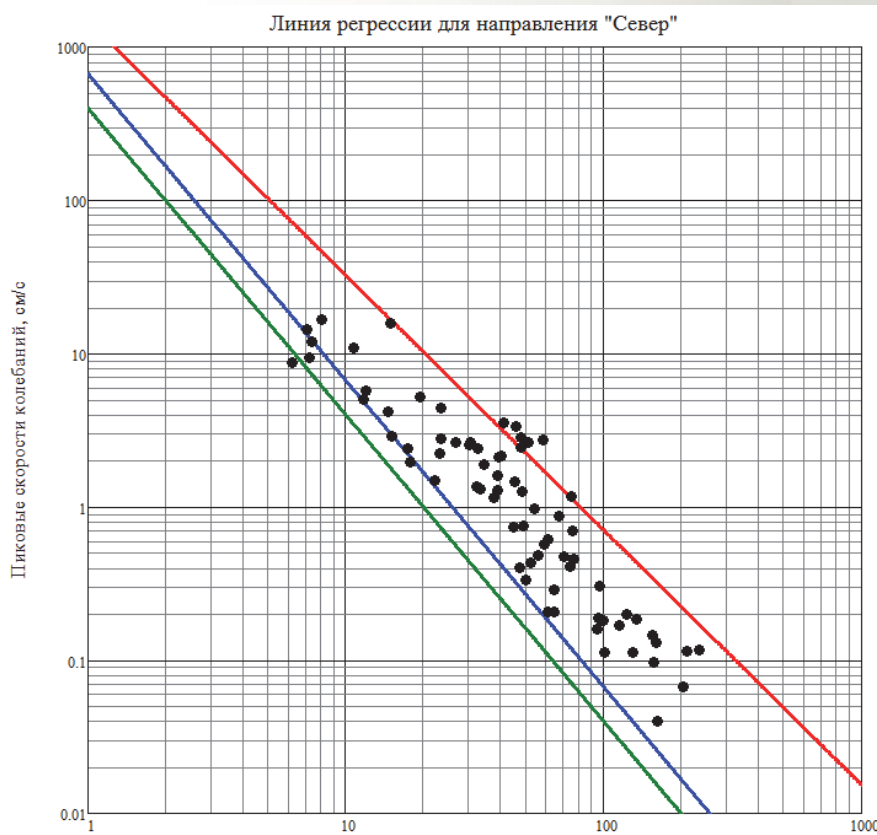


Рис. 2. Сравнение надежности прогноза по методике Новационной фирмы «КУЗБАСС-НИИОГР» в сравнении с методиками, использующими справочные данные. Скорость колебаний $v = K R_{\text{пр}}^b$, где K — коэффициент сейсмичности, b — показатель затухания сейсмических волн с расстоянием.

K , b — коэффициенты, определяемые либо экспериментально, либо по справочным данным.

Расчет по справочным данным: $K = 400$, $b = -2$ (зеленая линия регрессии); $K = 670$, $b = -2$ (синяя линия регрессии). Расчет по методике Новационной фирмы «КУЗБАСС-НИИОГР»: $K = 1485$, $b = -1,661$ (красная линия регрессии)

Практически все зарегистрированные пиковые скорости колебаний оказались выше прогнозируемых значений, полученных по методикам с использованием справочных данных. Конечно, далеко не во всех случаях будет наблюдаться такое существенное отличие. Но главным является одно — прогнозирование пиковой скорости колебаний с ориентацией на справочные данные, без учета специфики конкретного горного предприятия, может давать некорректные оценки. Именно большие расхождения между наблюдаемыми и прогнозируемыми результатами были причиной осознания необходимости разработки собственных подходов.

Статистический анализ «качества» экспериментальных данных и полученных регрессий

Следует сказать, что любой метод прогнозирования, в основе которого лежит обработка экспериментальных данных, должен включать в себя обязательную процедуру оценки качества полученных зависимостей. С чем это связано? Например, принято считать, что увеличение количества экспериментальных точек всегда ведет к повышению точности прогноза. Это не так. Если облако экспериментальных точек показывает слабую нелинейность, а мы пытаемся использовать линейную модель, то увеличение количества точек не приведет к повышению точности модели, т. к. эта регрессионная модель будет статистически несостоятельной. Если разброс экспериментальных значений относительно линии регрессии не подчиняется нормальному закону распределения, то и доверительные интервалы, используемые в оценке сейсмической безопасности должны строиться с учетом этого фактора. Если статистические тесты показывают, что экспериментальные точки, полученные для разных направлений распространения сейсмических волн от взрываемого блока, не могут быть объединены в одну общую выборку, то и регрессионные модели (а значит и последующие рекомендации по безопасному ведению работ) должны

разрабатываться для каждого направления в отдельности.

Для возможности статистической оценки качества регрессии используются линейные регрессионные модели. Линеаризация уравнений регрессии осуществляется переходом к логарифмическим шкалам с последующей оценкой «достоверности» коэффициентов в уравнении регрессии:

$\log_{10} v = a + b \cdot \log_{10} R_{\text{пр}} + \varepsilon$, где v — пиковая скорость колебаний, мм/с; $R_{\text{пр}}$ — приведенное расстояние; a, b — коэффициенты регрессии, подлежащие статистической оценке; ε — случайный член, учитывающий разброс экспериментальных данных относительно линии регрессии.

Оценки коэффициентов регрессии a, b должны быть: несмещенными, эффективными и состоятельными в статистическом смысле. Для проверки этих свойств выполняется набор статистических тестов с использованием необходимых статистических критериев, проверяется нормальность закона распределения экспериментальных данных относительно линии регрессии и т. д.

Рекомендации по обеспечению сейсмобезопасного ведения взрывных работ разрабатываются только с учетом результатов статистических тестов.

Методика оценки сейсмической безопасности подземных трубопроводов

Как уже отмечалось, методический подход, о котором мы сейчас говорим, является достаточно общим. Например, одним из направлений применения данного метода является оценка сейсмической безопасности подземных трубопроводов. Очевидно, что в этом случае использование ФНП «Правила безопасности при взрывных работах» дает неадекватную оценку сейсмической безопасности, поскольку в основе нормативных методик лежит вероятность появления легких повреждений типа волосяных трещин в штукатурном растворе, осыпания побелки, откалывания мелких кусков штукатурки. Для

подземного трубопровода в этом случае реализуются совершенно другие виды предельных состояний.

Суть адаптации методики на подземные трубопроводы заключается в следующем. Сначала определяются напряжения, действующие в трубопроводе, а также резерв несущей способности, который может быть потрачен на восприятие сейсмических нагрузок. Особо следует оговорить, что напряжение определяется по нормативным строительным документам. На втором этапе определяется предельный уровень колебаний, т. е. предельно допустимые пиковые скорости колебаний, при которых резерв несущей способности трубопровода не будет превышен. Дальнейшие процедуры оценки сейсмической безопасности аналогичны описанным ранее.

Методика оценки сейсмической безопасности подземных горных выработок (в том числе проектируемых)

Несколько слов о применении метода для оценки сейсмической безопасности подземных выработок при ведении взрывных работ на поверхности. Краеугольным камнем в этом случае является выбор предельно допустимых скоростей колебаний. Анализ имеющихся публикаций показывает, что разброс предельно допустимых скоростей колебаний очень большой. Как правило, рекомендуемые значения предельно допустимых скоростей колебаний получены для конкретных условий отдельного горного предприятия. Большинство значений не имеют оценки обеспеченности (оценки вероятности появления повреждений). В любом случае мы опираемся только на подтвержденные экспериментальные данные и в настоящее время используем достаточно консервативные оценки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при взрывных работах» (утверждены приказом Ростехнадзора от 16.12.2013. № 605, зарегистрированы в Минюсте России 01.04.2014. № 31796).
2. ГОСТ Р 52892-2007. Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибрации и оценка ее воздействия на конструкцию. М., 2008. 32 с.

Направления дальнейших исследований в области сейсмической безопасности массовых промышленных взрывов

На наш взгляд, основными направлениями, по которым ведутся и развиваются разработки Новационной фирмы «КУЗБАСС-НИИОГР», являются такие, как возможность гармонизации наших подходов с требованиями нормативных документов зарубежных стран в части возможности использования наряду с 20-мс скользящим окном и 8-мс окна.

Мы считаем также необходимым продолжить разработку критериев сейсмической безопасности, с учетом дискомфорта жителей прилегающих районов.

Выводы

Двадцатилетний опыт исследований научных сотрудников и экспертов Новационной фирмы «КУЗБАСС-НИИОГР», а также практики применения разработанных фирмой рекомендаций на горных предприятиях Кузбасса, Новосибирской области и Красноярского края позволяют утверждать, что сейсмическую безопасность массовых промышленных взрывов в настоящее время можно уверенно гарантировать и контролировать. Следование организациями-недропользователями и организациями, ведущими взрывные работы, рекомендациям, разработанным на основании предложенных Новационной фирмой «КУЗБАСС-НИИОГР» методических подходов, позволяет практически исключить негативное сейсмическое воздействие на прилегающие объекты как самого горного предприятия, так и на объекты третьих лиц, прежде всего жилых зданий и зданий социального назначения.

3. OSM Blasting Performance Standards. 30 Code of Federal Regulations. Sec. 816.67. Use of Explosives: Control of adverse effects.

4. BS 7385-2:1993. British Standard. Evaluation and measurement for vibration in buildings. Part 2: Guide to damage levels from groundborne vibration. BSI, 1993. 15 p.

5. DIN 4150-3:1999. Structural Vibration. Part 3: Effects of vibration on structures. 1999. 11 p.

6. Новиньков А.Г., Протасов С.И., Гукин А.С. Оценка сейсмобезопасности массовых промышленных взрывов // Безопасность труда в промышленности. 2013. № 6. С. 40–48.

7. Новиньков А.Г., Протасов С.И., Самусев П.А., Гукин А.С. Статистическая надежность прогнозирования пиковой скорости колебаний при массовых промышленных взрывах // ФТ-ПРПИ. 2015. № 5. С. 50–57.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2019.13.3.003

UDC 622.235

© A.G. Novinkov, S.I. Protasov, P.A. Samusev, 2019

A.G. NOVINKOV

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Examination of Buildings and Structures
Innovation company «KUZBASS-NIIOGR»,
Kemerovo
e-mail: firma@kuzbass-niiogr.ru

S.I. PROTASOV

Candidate of Engineering Sciences, Professor,
Director
Innovation company «KUZBASS-NIIOGR»,
Kemerovo
e-mail: protasov@kuzbass-niiogr.ru

P.A. SAMUSEV

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
Technical Expert
Innovation company «KUZBASS-NIIOGR»,
Kemerovo
e-mail: firma@kuzbass-niiogr.ru

EXPERIENCE IN MANAGING EARTHQUAKE SAFETY OF MASS EXPLOSIONS

The seismic effect of the explosion is one of the hazards of blasting operations. The danger of seismic action is manifested in the form of the risk of various types of damage in protected buildings and structures. In order to ensure seismic safety during blasting operations, it is necessary to correctly predict the peak vibration speed of the Earth's surface. The article discusses in detail the approaches of ensuring the forecast of peak vibration speeds with the required level of reliability.

Keywords: MASS EXPLOSIONS, SEISMIC SAFETY OF MASS EXPLOSIONS, SEISMICITY OF EXPLOSIVE WORKS, EXPLOSIVE WORKS, SEISMIC IMPACT OF EXPLOSION, REGRESSION ANALYSIS.

REFERENCES

1. Federal rules and regulations in the field of industrial safety «Safety rules for blasting operations» [Federaniye normi i pravila v oblasti promyshlennoy bezopasnosti «Pravila bezopasnosti pri vzrivnyh rabotah»] (approved by order of Rostekhnadzor from 16.12.2013 No. 605, registered in the Ministry of Justice of Russia on 01.04.2014 №. 31796. (In Russ.).
2. GOST R 52892-2007. Vibration and shock. Vibration of buildings. Measurement of vibration and evaluation of its effect on the structure [GOST R 52892-2007. Vibratsiya i udar. Vibratsiya zdaniy. Izmereniye vibratsii i otsenka eyo vozdeistviya na konstruktsiyu]. Moscow, 2008. 32 p. (In Russ.).
3. OSM Blasting Performance Standards. 30 Code of Federal Regulations. Sec. 816.67. Use of Explosives: Control of adverse effects.
4. BS 7385-2:1993. British Standard. Evaluation and measurement for vibration in buildings. Part 2: Guide to damage levels from groundborne vibration. BSI, 1993. 15 p.
5. DIN 4150-3:1999. Structural Vibration. Part 3: Effects of vibration on structures. 1999. 11 p.
6. Novinkov A.G., Protasov S.I., Samusev P.A. An Assessment of Seismic Safety of Large-Scale Mining Blasts // Occupational Safety in Industry [Bezopanost truda v promyshlennosti]. 2013. № 6. p. 40–48. (In Russ.).
7. Novinkov A.G., Protasov S.I., Samusev P.A., Gukin A.S. Statistical Reliability of Forecasting Peak Particle Velocity Under Large-Scale Production Blasting // Journal of Mining Science. 2015. T. 51. № 5. P. 901–907. (In Russ.).