УДК 622.235.5:622.271

Самусев Евгений Александрович, технический директор
АО «Горно-рудная компания «Перевальное»
Артёмов Еремей Евгеньевич, студент гр. ГОс-211
Глушков Алексей Сергеевич, студент гр. ГОс-211
Eugene A. Samusev, technical director
Mining Company «Perevalnoe» JSC
Eremey A. Artemov, student
Alexey S. Glushkov, student
Kuzbass State Technical University

СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТЬ МАССОВЫХ ВЗРЫВОВ НА КАРЬЕРАХ

SEISMIC SAFETY OF MASS EXPLOSIONS IN QUARRIES

В работе рассмотрены вопросы оценки сейсмической безопасности массовых промышленных взрывов с анализом различных методических подходов.

The paper addresses the assessment of seismic safety during large-scale industrial blasting, with an analysis of various methodological approaches.

Буровзрывные работы долгие годы являются предметом научных исследований ученых кафедры открытых горных работ (ОГР) Кемеровского горного, Кузбасского политехнического институтов и в настоящее время Кузбасского государственного технического университета. Исследования с самого начала строились на представительном экспериментальном материале, получаемом с использованием современной аппаратуры и методов испытания свойств горных пород в образцах и в массиве. Результаты этих исследований, в частности методика оптимизации параметров буровзрывных работ 1981 г. [1], широко используются в практике работы разрезов Кузбасса, других регионов России и стран СНГ. Актуализированная версия методики изложена в монографии [2], изданной в 1996 г.

В последние 20 лет кафедра ОГР в содружестве с Новационной фирмой «КУЗБАСС-НИИОГР» проводит исследования по проблеме обеспечения сейсмобезопасности взрывных работ, проводимых на разрезах Кузбасса, часть из которых расположена в непосредственной близости от населенных пунктов.

Оценка сейсмической безопасности при массовых промышленных взрывах является нетривиальной задачей. Существуют различные подходы

к определению сейсмобезопасных расстояний при ведении взрывных работ на горных предприятиях.

Основной из них, заложенный в требования ФНП «Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения» [3], базируется на недопущении превышения максимальной скорости смещения грунта под защищаемым объектом.

При короткозамедленном взрывании на сейсмическое действие взрыва согласно [3] основное влияние оказывает масса ВВ в группе зарядов.

В п. 794 Федеральных нормах и правил [3] приводятся указания по определению сейсмобезопасных расстояний при неодновременном взрывании N зарядов взрывчатых веществ (количество групп) общей массой Q, при этом замедления между взрывами каждого заряда должно быть не менее 20 мс.

$$r_c = \frac{K_г \times K_с \times \alpha}{\sqrt[4]{N}} \times \sqrt[3]{Q},$$

где r_c - расстояние от места взрыва до охраняемого здания (сооружения), м; $K_г$ - коэффициент, зависящий от свойств грунта в основании охраняемого здания (сооружения); $K_с$ - коэффициент, зависящий от типа здания (сооружения) и характера застройки; α - коэффициент, зависящий от условий взрывания; N - количество зарядов взрывчатого вещества (количество групп); Q - общая масса всех зарядов, кг.

На сегодняшний момент общепринято, что максимальная скорость колебаний (максимальная скорость смещения частиц грунта) является главным критерием оценки уровня сейсмического воздействия взрыва на массив горных пород.

Максимальная скорость смещения грунта, как критерий сейсмической опасности при ведении взрывных работ, впервые обоснована проф. М. С. Садовским в работах, датируемых 30-40-ми годами прошлого века. При этом использован критерий энергетического подобия, который позволяет связать максимально допустимую скорость колебаний грунта с расстоянием от точки взрыва до защищаемого объекта и мощностью (весом) заряда взрывчатых веществ (ВВ). Система поправочных коэффициентов корректирует предельно допустимые скорости, а, следовательно, и сейсмобезопасные расстояния, с учетом свойств грунтов, вида и повторяемости взрывов, существующих повреждений зданий и т.д.

Эмпирическая зависимость между скоростью смещения грунта и расстоянием до взрываемого блока, а также мощностью заряда имеет вид

$$\upsilon = \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r}\right)^n,$$

где υ - скорость смещения грунта в основании защищаемого объекта, м/с; Q- масса взрывчатого вещества, кг; r - расстояние между точкой взрыва и защищаемым объектом, м; n - эмпирический показатель степени.

Следует отметить, что подобная эмпирическая форма связи скорости колебаний грунта под защищаемым объектом с мощностью взрыва и расстоянием до него не является единственной. Например, в британском стандарте BS 6472-2:2008 [4], регулирующем влияние взрывных воздействий на человека, приводится линейное уравнение регрессии в логарифмическом масштабе, связывающее максимальную скорость колебаний основания с приведенным расстоянием R. Само приведенное расстояние R записывается в виде

$$R = \frac{r}{\sqrt{Q}},$$

где r - расстояние между зарядом и точкой измерений, м; Q - масса заряда, кг.

Для сравнения - в российских нормах по защите атомных электростанций от аварийных взрывов РБ Г-05-039-96 [5], в знаменателе выражения для приведенного расстояния использован кубический корень вместо квадратного.

К числу недостатков такого подхода к нормированию сейсмических воздействий по предельно допустимой скорости колебаний следует отнести тот факт, что ни максимальные скорости колебаний, ни максимальные ускорения, ни максимальные смещения земной поверхности при колебаниях не могут служить критерием опасности для зданий и сооружений, т.к. они не учитывают продолжительность активной фазы колебаний; эффективную ширину спектра (т.е. ту часть спектра колебаний, которая перекрывается с диапазоном основных частот колебаний защищаемого объекта), а также влияние других факторов, таких, например, как совместное действие сейсмических и ударных воздушных волн на защищаемые объекты, а также длину сейсмических воли, которые в случае прихода под протяженные объекты вызывают кручение здания или сооружения в плане (наиболее опасных вид деформаций объекта). Кроме того, не учитывается тот общеизвестный факт, что разовые высокочастотные пиковые выбросы не оказывают существенного влияния на несущую способность зданий или сооружений.

Выбор в качестве критерия сейсмической опасности максимальной скорости колебаний земной поверхности обусловлен, главным образом, тем фактом, что наблюдаемые повреждения лучше всего коррелируют именно с пиковой скоростью. Корреляция между пиковыми ускорениями и повреждениями значительно хуже. При этом сама корреляция выполняется с использованием концепции балльности, т.е. повреждения при взрывах соотносятся с одной из макросейсмических шкал. Чаще всего при этом используется шкала интенсивности сейсмических колебаний МСК-64 [4] и ее модификации МСК-72, МСК-78, ММСК-84 и т.д. При этом следует подчеркнуть, что несмотря на то, что некоторые из макросейсмических шкал помимо описательной части имеют и инструментальную, последняя носит лишь оценочный, вспомогательный характер.

Отдельно следует упомянуть то обстоятельство, что инструментальные замеры скорости (или ускорений) колебаний несут в себе систематическую инструментальную ошибку. Приборы, используемые при сейморегистрации, отличаются только диапазоном работы внутреннего инерционного элемента. Одни из них (акселерометры, регистрирующие ускорения) работают в дорезонансной области, когда частота собственных колебаний инерционного элемента выше частоты внешних воздействий. Другие сейсморегистраторы (велосиметры, регистрирующие скорости колебаний) предназначены для работы в зарезонансной области. Однако спектр взрывных воздействий имеет максимумы в высокочастотной области в то время, как для зданий и сооружений представляет интерес низкочастотный диапазон. Это ведет к тому, что часть фактического широкополосного диапазона колебаний, как при использовании велосиметров, так и акселерометров, будет содержать систематическую ошибку, связанную с регистрацией в околорезонансной области, что может внести существенную погрешность в определение пиковых значений. Для устранения этих погрешностей используются различные цифровые фильтры. Кроме того, частота снятия отсчетов должна быть достаточно высокой, чтобы уловить около пиковые значения, что налагает повышенные требования к регистрирующей аппаратуре, особенно при массовых взрывах с малыми интервалами замедления.

Наконец, российские нормативные документы никак не связывают максимальные скорости колебаний при взрывах с требуемым уровнем комфорта для жителей прилегающих районов. Санитарные нормы и правила нормируют только другие виды вибраций и звуковых воздействий.

В то же время использование в качестве критерия сейсмической опасности при ведении взрывных работ максимальной скорости колебаний земной поверхности имеет то неоспоримое преимущество, что достаточно длительное (в течение десятков лет) использование этого критерия на зданиях и сооружениях массовой застройки обеспечивало достаточно приемлемый уровень сейсмической безопасности. Кроме того, такой подход чрезвычайно прост и применим в условиях оперативной деятельности горных предприятий. Наконец, использование максимальной скорости колебаний, как критерия сейсмической опасности при массовых промышленных взрывах зафиксировано во многих нормативных документах, включая российские, например в ГОСТ Р 52892-2007 [6]. Аналогичные подходы использованы в зарубежных нормативных документах [7, 8].

Второй подход базируется на оценке сейсмической реакции защищаемых объектов. Данный подход используется при оценке сейсмических воздействий природного происхождения и реализован в [9], а также в других нормативных документах, связанных со строительством в сейсмически опасных районах, например [10, 11].

В свою очередь оценка сейсмической реакции на основании перечисленных нормативных документов может производиться двумя методами - на

основании спектрального подхода и с использованием прямого интегрирования уравнений движения. Спектральный подход является обязательным для всех видов зданий и сооружений. Но прямой перенос этих положений на условия промышленных взрывов невозможен в силу следующих причин.

1. Природное землетрясение представляет собой редкий случайный процесс. Различная вероятность появления сейсмического события проектной интенсивности учитывается использованием разных карт общего сейсмического районирования. Например, для объектов массовой застройки используется карта сейсмического районирования ОСР-97Л [9], отражающая 90 %-ую вероятность непревышения расчетной балльности в течение пятидесяти лет, что соответствует периоду повторяемости расчетных сейсмических сотрясений один раз примерно в пятьсот лет. Массовые промышленные взрывы воздействуют на защищаемые объекты с гораздо более высокой частотой, в силу этого необходимо обеспечить аналогичную расчетную вероятность непревышения.

2. Спектральный состав и длительность природного землетрясения отличаются от параметров взрывного сейсмического воздействия, соответственно будут отличаться коэффициенты динамичности и расчетные амплитуды ускорений. В [12] приводятся методологические предпосылки и примеры нахождения коэффициентов динамичности для массовых промышленных взрывов в рамках линейно-спектрального подхода.

3. Критерий интенсивности природного сейсмического воздействия, использованный в нормативной литературе и выраженный в терминах «балльности», связывает возможные повреждения зданий и сооружений с некоторой «приведенной» или «эффективной» максимальной амплитудой ускорений. Однако, как уже отмечалось выше, балльности природного воздействия и сейсмическом воздействия, от промышленного взрыва будут существенно отличаться даже при одинаковой величине максимального ускорения. Это обусловлено и намного меньшей длительностью взрывного воздействия, и смещением спектра взрывного воздействия в высокочастотную область. Кроме того, как отмечалось выше, максимальное ускорение земной поверхности в меньшей степени коррелирует с повреждениями объектов.

Альтернативой спектральному методу расчета является прямой динамический анализ защищаемых объектов на конкретные записи воздействий. В качестве примера использования прямого динамического анализа защищаемых объектов можно привести работы [13], выполненные за последние 20 лет учеными и специалистами ГУ КузГТУ и Новационной фирмы «КУЗБАСС-НИИОГР».

Подход на основании оценки сейсмической реакции более приемлем для оценки сейсмических воздействий от промышленных взрывов, но пока достаточно трудоемок и применим на этапе детальных исследований по оценке сейсмического действия массовых взрывов на открытых горных работах на конкретные наиболее ответственные здания и сооружения.

Используя подход, основанный на оценке сейсмической реакции защищаемых объектов, экспертам Новационной фирмы «КУЗБАССНИИОГР» и учеными кафедры ОГР ГУ КузГТУ удалось решить ряд сложных производственных задач для разрезов и карьеров Кузбасса, разработав на основании сейсмологических исследований рекомендации по обеспечению безопасных условий ведения взрывных работ на карьерах в непосредственной близости от населенных пунктов и защищаемых объектов за счет изменения параметров буровзрывных работ, позволяющих уменьшить воздействие сейсмических [14-22], ударных воздушных волн [23] и снизить дальность разлета породы [24] на конкретный защищаемый объект или группу объектов, а также оценить влияние взрывных работ на грансостав взорванной горной массы [25-30].

Список литературы

1. Методическое руководство по выбору схем ведения взрывных работ на угольных разрезах с учетом физико-механических свойств угля и использования средств механизации. – Челябинск: НИИОГР, Министерство угольной промышленности СССР, 1981. - 100 с.
2. Статистические модели в процессах горного производства / Бирюков А.В., Кузнецов В.И., Ташкинов А.С. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 1996. – 228 с.
3. ФНП «Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения» (утверждены приказом Ростехнадзора от 03.12.2020г. № 494, зарегистрированы в Минюсте России 25.12.2020 г. № 61824).
4. BS 6472-2:2008. British Standard. Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings. Part 2: Blast-induced vibration, 2008. - 20 pp.
5. РБ Г-95-039-96. Руководство по анализу опасности аварийных взрывов и определению параметров их механического действия. - М, 2006.
6. ГОСТ Р 52892-2007. Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибрации и оценка ее воздействия на конструкции. - М.: Стандартинформ, 2008. - 32 с.
7. BS 73 85: Part 2: 1993 Evaluation and measument for vibration in buildings. Part 2. Guide to damage levels from grounborne vibration, 1993. - 14 pp.
8. DIN 4150-3:1999-02. Structural vibration. Part 3. Effects of vibration on structures, 1999. - 11 pp.
9. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. М.: Минрегионразвития России, 2018.

10. НП 031-01 «Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций» М.: Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности (Госатомнадзор России), 2001.

11. СП 31-114-2004. Правила проектирования жилых и общественных зданий для строительства в сейсмических районах. - М., 2005.

12. Гукин А. С. Построение коэффициентов динамичности по спектрам ответа при сейсмических воздействиях массовых промышленных взрывов / А. С. Гукин, А. Г. Новиньков, П. А. Самусев, С. И. Протасов // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: Труды XII Международной научно-практической конференции. - Кемерово, 2010.-е. 131-133.

13. Иванов В. В. Экспериментально-теоретическая оценка несущей способности каркаса здания гаража при сейсмическом воздействии от промышленных взрывов / В. В. Иванов, А. С. Ташкинов, С. И. Протасов, А. Г. Новиньков // Вестник КузГТУ, 2002,- №1.- С.3 7-42.

14. Novinkov A. G., Tashkinov A. S., Protasov S. I., Samusev P. A. Determination of Seismic Safe Distances During Mining Blasts with Consideration of a Dominant Vibration Frequency // Coal in the 21st Century: Mining, Processing and Safety. Atlantis Press. 2016. P. 202-205.

15. Novinkov A., Protasov S., Samusev P. Ensuring Seismic Safety of Underground Mines During Blasting Operations in Combined Surface-Underground Deposit Development // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 174. Article 01016. DOI: 10.1051/e3sconf/202017401016.

16. Новиньков А.Г. Определение сейсмобезопасных расстояний при массовых промышленных взрывах с учетом преобладающей частоты колебаний / Новиньков А.Г., Протасов С.И., Самусев П.А., Ташкинов А.С. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. № 6 (118). С. 56-62.

17. Новиньков А.Г. Сейсмическая безопасность подземных горных выработок при ведении взрывных работ на земной поверхности / Новиньков А.Г., Протасов С.И., Самусев П.А. // Безопасность труда в промышленности. - №8, 2018. – С. 64-68.

18. Новиньков А.Г. Практический метод учета преобладающей частоты колебаний при определении сейсмобезопасных расстояний при ведении взрывных работ на карьерах / Новиньков А.Г., Протасов С.И., Самусев П.А. // Сборник «Взрывное дело» №115/72. – 2016. – С. 214-225.

19. Новиньков А.Г. Сейсмическая безопасность подземного газопровода при массовых промышленных взрывах на угольном карьере / Новиньков А.Г., Протасов С.И., Самусев П.А. // Вестник КузГТУ. 2013, №6 (100).- С.51-55.

20. Новиньков А.Г. Практические способы повышения точности прогноза пиковой скорости колебаний при оценке сейсмической безопасности

взрывных работ / Новиньков А.Г., Протасов С.И., Самусев П.А. // Вестник НЦ ВостНИИ. - №4, 2021. – С. 5-15.

21. Новиньков А.Г. Обеспечение сейсмической безопасности строительных объектов при массовых промышленных взрывах с учетом предельных состояний первой группы / Новиньков А.Г., Самусев П.А., Протасов С.И. // Безопасность труда в промышленности. 2024. № 2. С. 48-57.

22. Самусев П.А. Сравнительная оценка сейсмического действия массовых взрывов при применении различных систем инициирования / Самусев П.А., Новиньков А.Г., Протасов С.И., Завьялов А.Н. // Сборник «Взрывное дело» № 141/98. – 2023. – С. 107-134.

23. Новиньков А.Г. Обзор российский и зарубежных исследований критериев повреждаемости зданий и сооружений от действия ударных воздушных волн, возникающих при ведении взрывных работ / Новиньков А.Г., Протасов С.И., Самусев П.А. // Развитие добычи угля в Кузбассе открытым способом: сб. науч. тр., посвященный 60-летию кафедры «Открытые горные работы» / КузГТУ. - Кемерово: АИ «Кузбассвузиздат, 2015. – с. 214-223 с.

24. Самусев П.А. Определение дальности разлета отдельных кусков породы при взрывании скважинных зарядов / П.А. Самусев, А.Г. Новиньков, С.И. Протасов // Техника и технология горного дела. – 2023. – № 4(23). – С. 4-25. – DOI: 10.26730/2618-7434-2023-4-4-25.

25. Бирюков А.В. Некоторые вопросы гранулометрии / А.В. Бирюков, П.А. Самусев, С.И. Протасов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 1998. № 1 (2). С. 27-28.

26. Бирюков А.В. Дисперсные системы горного дела / А.В. Бирюков, С.И. Протасов, П.А. Самусев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2014. № 3 (103). С. 60-62.

27. Самусев П. А. Исследование влияния технологических процессов добычи угля на его грансостав // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 1999. № 2(9). С. 50-51.

28. Бирюков А.В. Прогнозирование гранулометрического состава угля / А.В. Бирюков, С.И. Протасов, П.А. Самусев // В кн.: Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири: материалы 2-й Междунар. науч.-практ. конф., г. Кемерово, 11–14 ноября 1997 года. Кемерово: Кузбас. гос. техн. ун-т; 1997. Ч. 1. С. 165–166.

29. Бирюков А.В. Гранулометрия угля / Бирюков А.В., Паначев И.А., Самусев П.А. // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2001. № 1. С. 7-9.

30. Марков, С. О. Гранулометрический состав отвальных массивов разрезов Кузбасса / С. О. Марков, Е. В. Мурко, Ф. С. Непша // Горные науки и технологии. – 2021. – Т. 6, № 4. – С. 259-266. – DOI 10.17073/2500-0632-2021-4-259-266. – EDN EBGHLA.