

DOI: 10.25558/VOSTNII.2021.20.75.001

УДК 622.235

© П.А. Самусев, А.Г. Новиньков, С.И. Протасов, 2021

П.А. САМУСЕВ

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



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.r



ПРАКТИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗА ПИКОВОЙ СКОРОСТИ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ОЦЕНКЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ

Эффективность разработки твердых полезных ископаемых открытым способом напрямую связана с проведением буровзрывных работ. Однако помимо основной задачи — качественной подготовки пород к выемке — промышленные взрывы иногда оказывают и негативное воздействие на здания и сооружения поверхностного комплекса, а также прилегающих населенных пунктов. Одним из опасных факторов 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 взрывных работ необходимо в соответствии с требованиями нормативных документов обеспечить вероятность непревышения прогнозного значения пиковой скорости колебаний земной поверхности на уровне 0,95–0,98 (95–98 %). В статье подробно рассмотрены практические подходы повышения надежности прогноза пиковых скоростей колебаний на основе регрессионного анализа экспериментальных данных.

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

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с требованиями ФНП «Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения» [1] для зданий и сооружений уникального характера, ответственных и сложных инженерных сооружений, а также в зданиях и сооружениях массовой застройки при наличии в них повреждений вопросы сейсмической безопасности должны решаться с привлечением специализированных (научных и экспертных) организаций. Новационная фирма «КУЗБАСС–НИИОГР» занимается вопросами обеспечения сейсмической безопасности массовых взрывах вблизи зданий массовой застройки [2, 3, 4], ответственных трубопроводов, газопроводов [5], гидротехнических сооружений и подземных горных выработок [6] уже более 20 лет.

КРАТКИЙ ОБЗОР МЕТОДИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ К ОБОСНОВАНИЮ СЕЙСМОБЕЗОПАСНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ

В качестве критерия сейсмической безопасности при массовых промышленных взрывах традиционно используется превышение предельного значения пиковой скорости колебаний $v \leq [v]$, где v — прогнозируемая скорость колебаний под защищаемым объектом, а $[v]$ — предельно допустимая скорость колебаний. Предельно допустимые значения пиковой скорости колебаний (правая часть неравенства) определяются по нормативным документам РФ [7] и других стран [8, 9] или, как например, в случае сейсмической безопасности газопроводов, магистральных водоводов, подземных горных выработок, спецсооружений, вычисляются явно, исходя из нормативных требований по критериям прочности, устойчивости и деформативности [10].

Левая часть неравенства представляет собой прогнозную скорость колебаний на заданном расстоянии от границы взрывающегося

блока до защищаемого объекта с учетом технологии взрывания и горно-геологических условий на пути распространения сейсмических волн. Двадцатилетний опыт Новационной фирмы «КУЗБАСС–НИИОГР» в области обеспечения сейсмической безопасности при взрывных работах говорит о том, что прогноз пиковой скорости колебаний можно достоверно оценить только на основе экспериментальных данных, которые автоматически включают в себя особенности формирования и распространения сейсмических волн на конкретной площадке угольного или горнодобывающего предприятия и вокруг нее. Все остальные способы, опирающиеся на справочные данные, могут давать (и, как правило, в большинстве случаев дают) очень большие расхождения между прогнозируемыми и наблюдаемыми значениями.

Методический подход Новационной фирмы «КУЗБАСС–НИИОГР» опирается на регрессионный анализ [11]. По облаку экспериментальных точек с использованием метода наименьших квадратов строится средняя линия регрессии (рис. 1). Затем строится верхняя граница доверительного интервала, которая учитывает дисперсию (разброс) наблюдаемых значений относительно линии регрессии. Ширина этого доверительного интервала рассчитывается так, чтобы в обычной ситуации обеспечить вероятность превышения прогнозного значения пиковой скорости колебаний на уровне 0,95 (95 %) [7]. Задаваясь значением предельно допустимой скорости колебаний, по расчетной границе доверительного интервала можно определить минимальное приведенное расстояние $R_{пр}$, по которому уже можно вычислить предельно допустимую массу ВВ в серии.

В отдельных случаях, когда речь идет не о появлении легких повреждений, а о возможном наступлении более опасных видов предельных состояний (например, при расчете сейсмической безопасности трубопроводов)

вероятность не превышения пиковой скорости колебаний повышается с 0,95 до 0,98, т. е. до уровня обеспеченности расчетных нагрузок в строительном проектировании.

Однако ответственный подход, опирающийся на экспериментальные данные, всегда заставляет задаваться вопросами, насколько адекватно, насколько надежно полученная регрессия позволяет прогнозировать пиковые скорости колебаний. Причина этого кроется в самой основе математической статистики.

Прогноз делается для генеральной совокупности, т. е. для бесконечного числа всех возможных значений приведенных расстояний, но по ограниченной выборке (ограниченному набору экспериментальных данных). Любое дополнение или изменение исходной ограниченной выборки ведет к изменению параметров регрессии. Поэтому важно гарантировать, что ограниченная выборка достаточно полно отражает статистические свойства бесконечного числа всех возможных случаев.

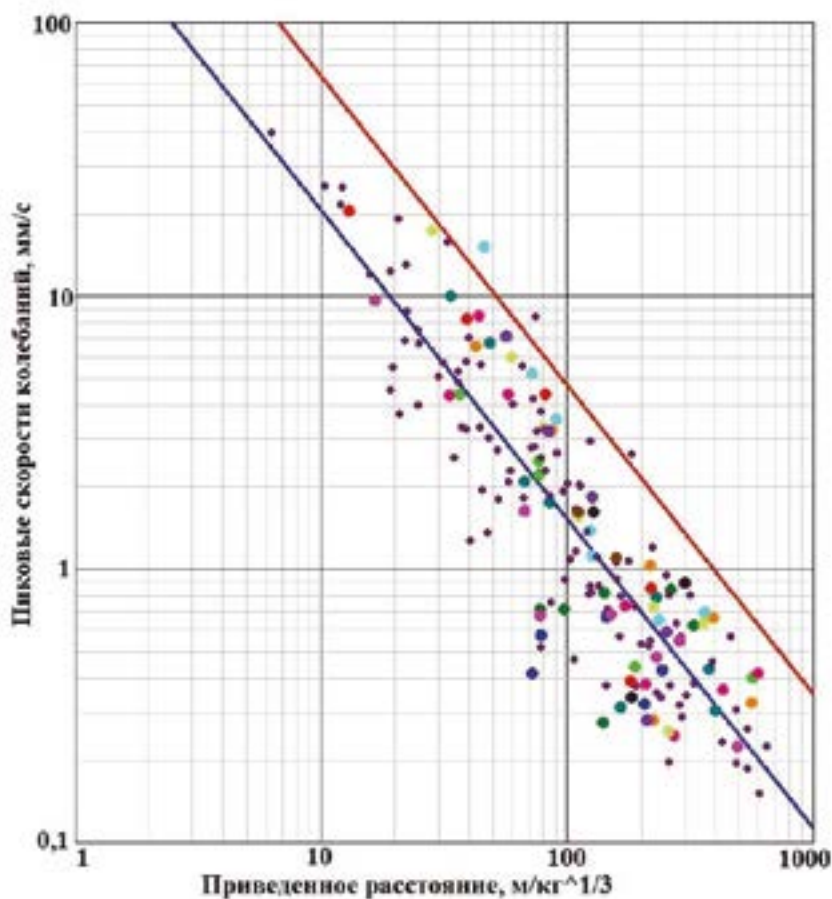


Рис. 1. График зависимости скорости колебаний от приведенного расстояния для экспериментальных массовых взрывов. На рисунке нанесены линии регрессии с обеспеченностью 50 % (синяя линия) и расчетной обеспеченностью 95 % (красная линия), также нанесены наблюдаемые скорости смещения земной поверхности. По оси абсцисс отложены приведенные расстояния, по оси ординат — скорости смещения, мм/с

Методика Новационной фирмы «КУЗ-БАСС-НИИОГР» как раз позволяет дать такую гарантию. Оценка надежности прогноза (оценка «качества» регрессии) производится на основе статистического анализа остатков (остатки — разброс наблюдаемых значений скоростей колебаний относительно их про-

гнозных значений в каждой экспериментальной точке). Проводится серия статистических тестов и делается вывод о пригодности полученной регрессии для оценки сейсмической безопасности или необходимы технические мероприятия по корректировке регрессии.

В табл. 1 приведены примеры некоторых

статистических процедур, используемых для проверки «качества» регрессии. Набор этих процедур достаточно обширен, каждая из них отвечает за свой фактор «надежности» регрессионной модели. В этой же таблице приведены возможные последствия игнорирования отрицательных результатов при прохождении этих тестов. Что делать, если регрессионная модель провалила какие-то статистические

тесты? Естественно, в этом случае прогнозная модель требует корректировки. Как правило, любая реальная физическая, математическая задача имеет несколько способов решения. Далее показаны возможные пути решения этих проблем, это будут не единственно возможные способы повышения надежности прогноза. Но они апробированы в условиях реальных угольных предприятий.

Таблица 1

Критерии качества регрессии на основе статистического анализа остатков

Факторы, влияющие на надежность прогноза	Последствия игнорирования результатов теста	Тип процедур
Статистическая состоятельность модели	Даже значительное увеличение числа экспериментальных точек НЕ ВЕДЕТ к повышению точности прогноза	1. Проверка на адекватность модели. 2. Тест на отсутствие автокорреляции остатков.
Статистическая эффективность модели	Граница доверительного интервала будет построена по не самой лучшей оценке дисперсии. Ширина доверительного интервала может быть завышена или занижена	1. Проверка закона распределения остатков на нормальность. 2. Учет, при необходимости, асимметрии распределения остатков.
Линейность модели	Нелинейная модель характеризуется невозможностью оценки «качества» регрессии, ее устойчивости к изменениям набора исходных данных	Модель принудительно линеаризуется. Например, переходом к логарифмическому шкалированию.
и т.д.

Примечание к табл. 1. Остатки — случайные отклонения наблюдаемых пиковых скоростей колебаний от средней линии регрессии.

На рис. 2 представлен набор экспериментальных точек для одного из угольных предприятий Кузбасса. Синим цветом показана исходная линия регрессии, построенная по данной выборке. Красным цветом показана

четная верхняя граница доверительного интервала. Данная модель провалила статистические тесты на автокорреляцию остатков и на адекватность регрессии.

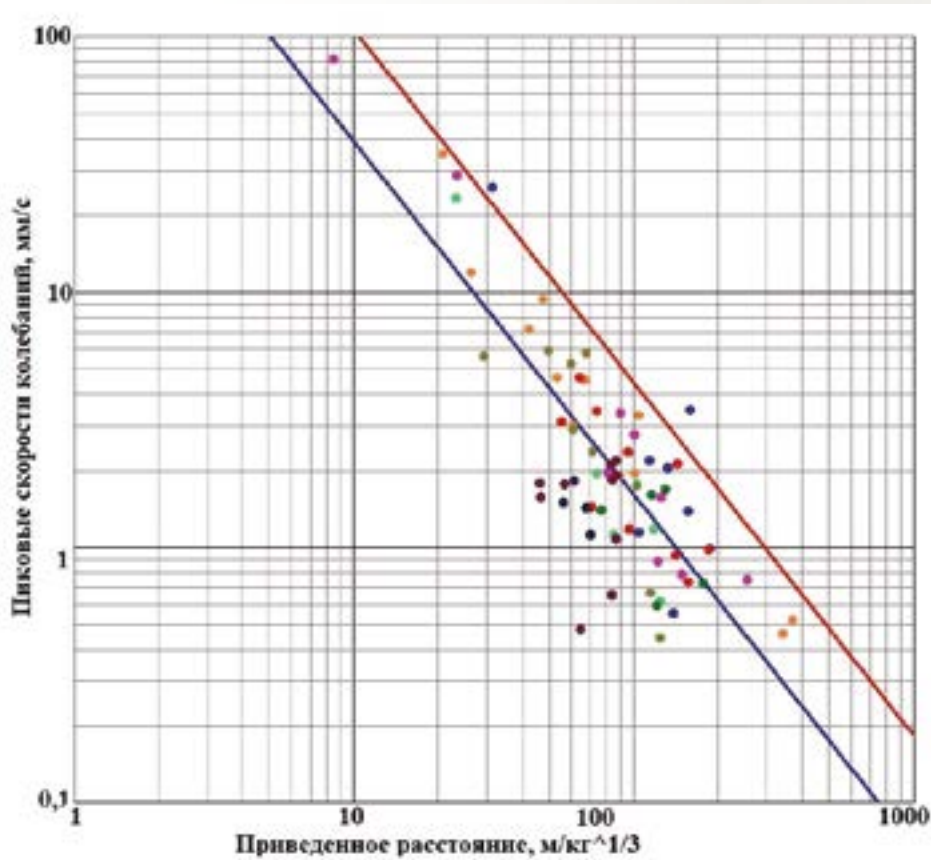


Рис. 2. Пример регрессионной модели, показавшей признаки статистической несостоятельности

В модели должна отсутствовать автокорреляция остатков, т. е. наблюдаемые экспериментальные точки должны располагаться относительно линии регрессии случайным образом, без признаков какой-либо зависимости. В действительности же мы наблюдаем, что при малых значениях приведенного расстояния все наблюдаемые значения имеют тенденцию располагаться выше линии регрессии, т. е. имеет место некоторая тенденция. Как следствие, возникает опасность, что в области относительно малых значений приведенных расстояний прогнозируемые скорости могут быть занижены относительно фактических значений. Регрессионная модель требует корректировки, потому что есть основания полагать, что даже при существенном увеличении числа экспери-

ментальных точек эта тенденция сохранится, т. к. выбранная модель линейной регрессии не вписывается в это облако экспериментальных точек. Модель статистически не состоятельна.

На рис. 3 показан один из способов коррекции регрессионной модели. Использована кусочно-линейная модель с применением метода фиктивных точек. Мы не можем просто разбить область приведенных расстояний на два интервала и построить для них две независимые регрессии. Метод фиктивных переменных позволяет адаптировать эти две регрессии, чтобы линии регрессии пересекались при заданном значении приведенного расстояния. Использованный подход позволил снизить неадекватность модели до приемлемого уровня.

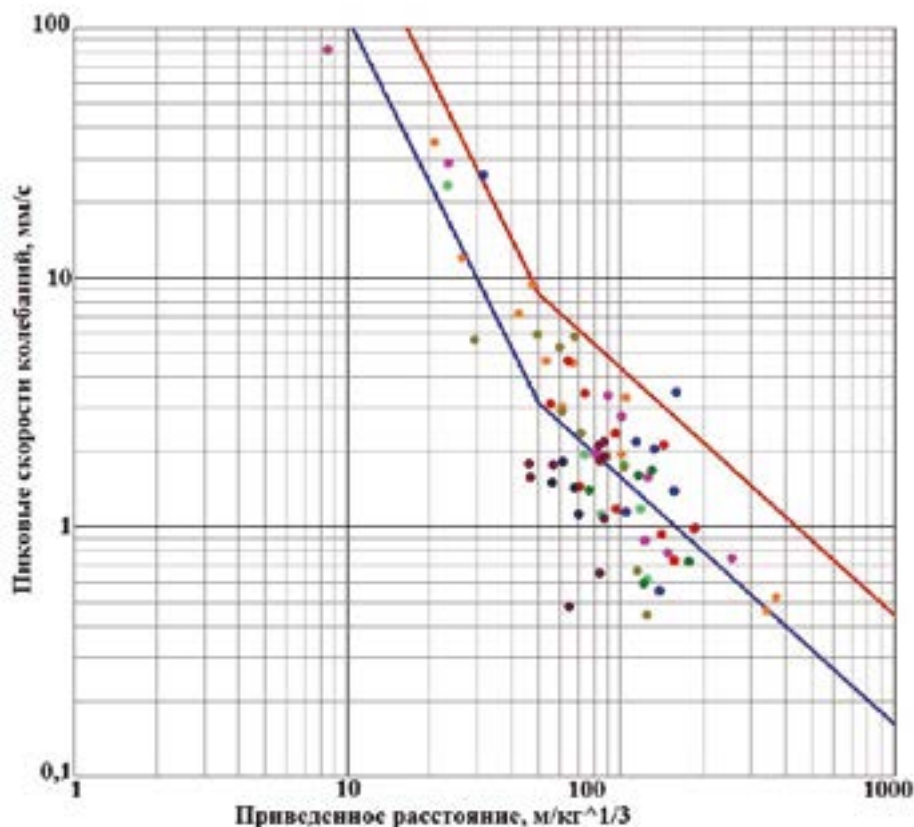


Рис. 3. Корректировка линейной регрессионной модели. Использование кусочно-линейной регрессии на базе метода фиктивных переменных

На следующем рис. 4 показана модель, непрошедшая тест на гомоскедастичность остатков. Т. е. тест показал, что разброс наблюдаемых значений пиковых скоростей относительно линии регрессии не постоянен во всем диапазоне приведенных расстояний, а увеличивается по мере увеличения приведенных расстояний $R_{пр}$. Возможные причины провала теста: наличие множества внешних факторов, которые дают зависимость остатков от объясняющей переменной $R_{пр}$; изменение грунтовых условий по мере удаления от взрываемого блока; увеличение инструментальных погрешно-

стей при малых значениях пиковых скоростей и т. д.

Так как для построения расчетной верхней границы доверительного интервала используется оценка дисперсии, усредненная по всему интервалу наблюдений, то получается, что в этом случае прогнозная скорость в области малых значений приведенных расстояний в отличие от предыдущего случая будет уже завышена. Одним из способов устранения этой проблемы является также переход на кусочно-линейную регрессию. Отметим, что это не единственный, но наиболее простой способ.

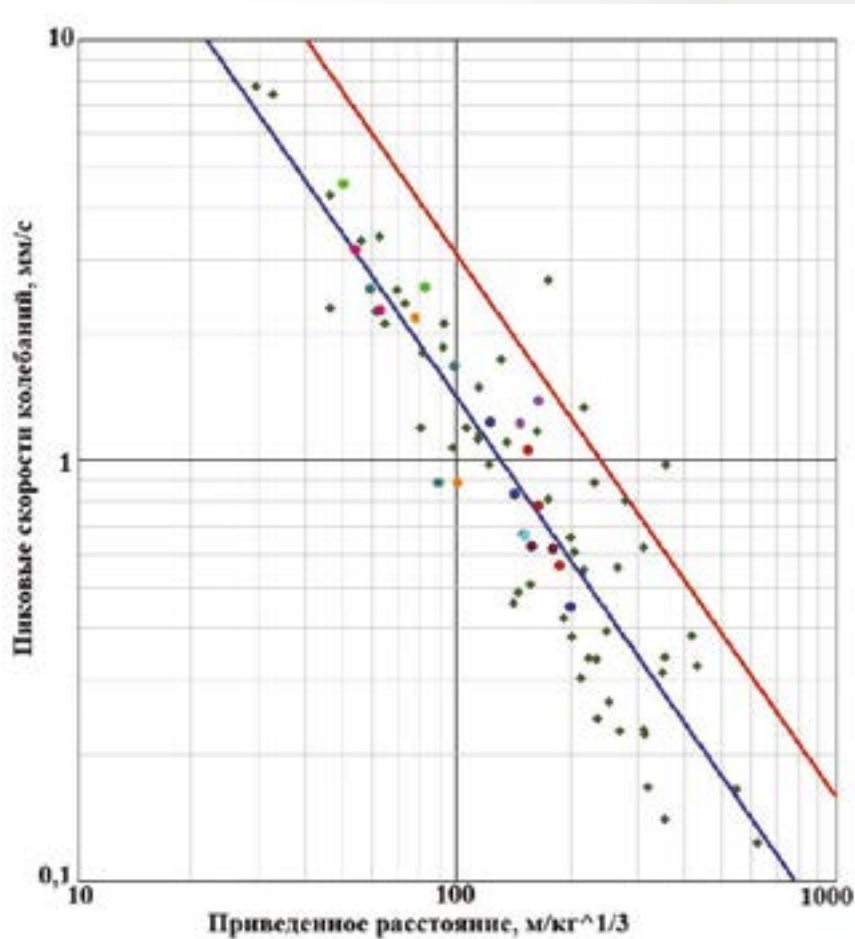


Рис. 4. Модель, не прошедшая тест на гомоскедастичность остатков (зависимость разброса наблюдаемых значений пиковых скоростей от объясняющей переменной $R_{пр}$)

Следующая проблема, прямо влияющая на надежность прогноза пиковых скоростей колебаний — это объем выборок, на которых строится регрессия. Невозможно гарантировать 95 % обеспеченность прогноза по выборке, к примеру, всего из 30 точек.

В табл. 2 приведено минимальное количество точек, требуемое для заданной обеспеченности прогноза. Если учесть, что часто требуется построение различающихся регрессий для разных направлений распространения сейсмических волн, то выполнение этих требований становится весьма трудоемкой задачей. Одним из простейших способов соблюдения этих требований является объединение отдельных выборок в одну общую выборку. Однако, если построить регрессии для таких отдельных выборок, то можно увидеть, что коэффициенты регрессии для них различаются. Поэтому необходимо выяснить, являются ли эти различия случайными, в пределах естественных случайных флуктуаций, или за

этим различием кроется более фундаментальная причина. Для ответа на этот вопрос мы обычно используем тест Чоу. Если тест провален, то делается вывод, что выборки не могут быть объединены в одну, более крупную.

Другим, на наш взгляд, чрезвычайно перспективным способом увеличения количества экспериментальных точек является синтез искусственных сейсмограмм по тем же принципам, которые используются для формирования синтетических акселерограмм в строительном проектировании для сейсмических районов. Новационная фирма «КУЗБАСС-НИИОГР» работает над этой задачей. Имеются определенные сложности, связанные с отличием взрывной сейсмике от природных землетрясений по длительности воздействия, по спектральному составу сейсмических волн и другим аспектам. Если эта задача будет решена, мы получим дополнительный инструмент для повышения обеспеченности прогноза пиковой скорости колебаний.

Таблица 2

Требования к объему исходных данных для требуемой обеспеченности прогноза

Вероятность непревышения (обеспеченность прогноза)	Минимальное количество экспериментальных точек	Область применения, критерий
0,9 (90 %)	40	Дискомфорт жителей
0,95 (95 %)	80	Появление легких повреждений в объектах массовой застройки (стандартные расчеты)
0,98 (98 %)	200	Предельная несущая способность (прочность газопроводов, водоводов, подземных горных выработок и т. д.)

На рис. 5 приведен пример сравнения двух выборок для разных лет наблюдений на предмет их объединения в одну общую выборку. Используется критерий Чоу. В данном случае статистический тест показал возможность такого объединения.

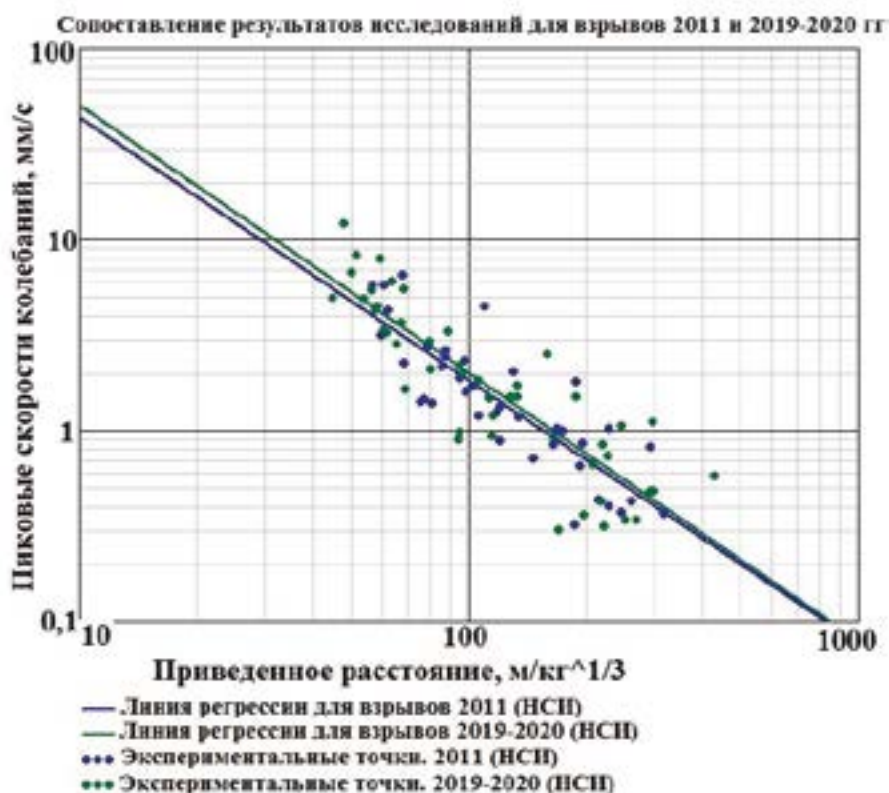


Рис. 5. Пример сравнения выборок для разных лет наблюдений на предмет их объединения в одну общую выборку

Еще один пример (рис. 6) возможных проблем при отсутствии верификации регрессионной модели — неучет асимметрии фактической плотности вероятности остатков, что ведет к тому, что расчетная верхняя граница, опреде-

ленная исходя из нормального распределения, при фактическом асимметричном распределении смещена относительно истинного значения. Это может вести как к занижению, так и к завышению прогнозных значений скорости.

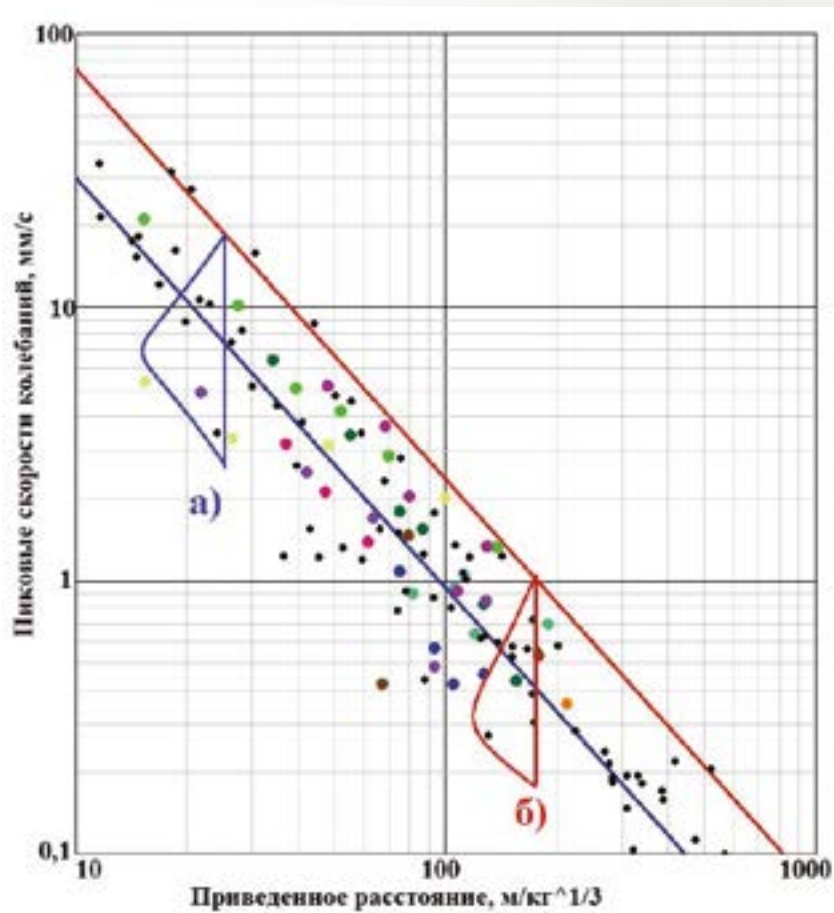


Рис. 6. Асимметричное распределение плотности вероятности остатков относительно линии регрессии

Характер функции плотности вероятности напрямую влияет на ширину доверительного интервала. Для коррекции положения расчетной верхней границы доверительного интервала могут быть использованы корректирующие коэффициенты из раздела Еврокодов (EN 1990 «Basic of Structural Design»), определяющего применение экспериментальных методов оценки несущей способности строительных конструкций.

Следует отметить, что в этой статье приведены лишь некоторые способы повышения точности прогноза пиковой скорости колебаний. Длительный опыт успешной работы Новационной фирмы «КУЗБАСС–НИИОГР» в области обеспечения сейсмической безопасности массовых промышленных взрывов подтверждает правильность выбранного нами экспериментального подхода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения: федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности (утверждены приказом Ростехнадзора от 03.12.2020 г. № 494, зарегистрированы в Минюсте России 25.12.2020 г. № 61824).
2. Новиньков А.Г., Протасов С.И., Самусев П.А., Гукин А.С. Статистическая надежность прогнозирования пиковой скорости колебаний при массовых промышленных взрывах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015. № 5. С. 50–57.
3. Новиньков А.Г., Протасов С.И., Самусев П.А., Ташкинов А.С. Определение сейсмобезопасных расстояний при массовых промышленных взрывах с учетом преобладающей частоты колебаний // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. № 6 (118). С. 56–62.

4. 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 // В сборнике: Coal in the 21st Century: Mining, Processing and Safety. 2016. P. 202–205.

5. Новиньков А.Г., Протасов С.И., Самусев П.А., Гукин А.С. Сейсмическая безопасность подземного газопровода при массовых промышленных взрывах на угольном карьере // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2013. № 6 (100). С. 51–55.

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

7. ГОСТ Р 52892-2007. Вибрация зданий. Измерение вибрации и оценка ее действия на конструкцию. М.: Стандартинформ, 2008.

8. DIN 4150-3:1999-02 Structural Vibration. Part 3. Effects of Vibration on Structures. 1999.

9. BS 7385-2:1993 Evaluation and measurement for vibration buildings. Part 2. Guide to damage levels from groundborne vibration. 1993.

10. СП 33.13330-2012. Расчет на прочность стальных трубопроводов. Актуализированная редакция СНиП 2.04.12-86. М., 2012. 28 с.

11. Новиньков А.Г., Протасов С.И., Гукин А.С. Практика применения регрессионного анализа для определения сейсмобезопасных расстояний при массовых промышленных взрывах // Взрывное дело. 2012. № 108/65. С. 333–346.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2021.20.75.001

UDC 622.235

© P.A. Samusev, A.G. Novinkov, S.I. Protasov, 2021

P.A. SAMUSEV

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
Technical Expert

Innovation company «KUZBASS-NIIOGR», Kemerovo
e-mail: firma@kuzbass-niiogr.ru

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

PRACTICAL METHODS OF INCREASING THE PREDICTION ACCURACY OF THE PEAK VIBRATION VELOCITY IN THE ASSESSMENT OF SEISMIC SAFETY OF EXPLOSION OPERATIONS

Efficiency of development of solid minerals by open method is directly related to drilling and blasting

operations. However, in addition to the main task — high-quality preparation of rocks for excavation — industrial explosions sometimes have a negative impact on buildings and structures of the surface complex, as well as adjacent settlements. One of the dangerous factors of blasting is the seismic effect of the explosion. The danger of seismic action is manifested in the form of the risk of various types of damage in protected buildings and structures. To ensure seismic safety of blasting operations, in accordance with the requirements of regulatory documents, it is necessary to ensure the probability of non-exceeding the forecast value of the peak oscillation rate of the earth's surface at the level of 0,95–0,98 (95–98 %). The article discusses in detail practical approaches to improving the reliability of predicting peak vibration rates based on regression analysis of experimental data.

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

REFERENCES

1. Safety rules for the production, storage and use of industrial explosives: federal norms and rules in the field of industrial safety (approved by order of Rostekhnadzor dated 03.12.2020 No. 494, registered with the Ministry of Justice of Russia on 25.12.2020, No. 61824). [In Russ.].
2. Novinkov A.G., Protasov S.I., Samusev P.A., Gukin A.S. Statistical Reliability of Prediction of the Peak Oscillation Velocity during Mass Industrial Explosions // Physical and technical problems of mining [Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh]. 2015. No. 5. P. 50–57. [In Russ.].
3. Novinkov A.G., Protasov S.I., Samusev P.A., Tashkinov A.S. Determination of seismic safe distances during mass industrial explosions taking into account the prevailing vibration frequency // Bulletin of the Kuzbass State Technical University [Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta]. 2016. No. 6 (118). P. 56–62. [In Russ.].
4. 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. 2016. P. 202–205.
5. Novinkov A.G., Protasov S.I., Samusev P.A., Gukin A.S. Seismic safety of an underground gas pipeline during massive industrial explosions at a coal open pit // Bulletin of the Kuzbass State Technical University [Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta]. 2013. No. 6 (100). P. 51–55. [In Russ.].
6. Novinkov A.G., Protasov S.I., Samusev P.A. Seismic safety of underground mine workings during blasting operations on the earth's surface // Industrial safety [Bezopasnost truda v promyshlennosti]. 2018. No. 8. P. 64–68. [In Russ.].
7. GOST R 52892-2007. Vibration of buildings. Measurement of vibration and assessment of its effect on the structure. M.: Standartinform, 2008. [In Russ.].
8. DIN 4150-3:1999-02 Structural Vibration. Part 3. Effects of Vibration on Structures. 1999.
9. BS 7385-2:1993 Evaluation and measurement for vibration buildings. Part 2. Guide to damage levels from groundborne vibration. 1993.
10. SP 33.13330-2012. Updated edition of SNIIP 2.04.12-86 Strength analysis of steel pipelines. M., 2012. 28 p. [In Russ.].
11. Novinkov A.G., Protasov S.I., Gukin A.S. The practice of using regression analysis to determine seismically safe distances during massive industrial explosions // Blasting [Vzryvnoye delo]. 2012. No. 108/65. P. 333–346. [In Russ.].