К.ДРЕБЕНСТЕДТ, С.ПЕССЛЕР
Фрайбергская горная академия, Германия

НОВЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ НА ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ СТЕКЛОВОЛОКНИСТЫХ КАБЕЛЕЙ

Описывается опыт использования нового метода исследований влияния взрывных работ на деформацию зданий и сооружений с применением оптоволоконных измерительных систем. С помощью таких систем может быть измерена деформация конструкций, как в течение коротких (1/300 с), так и длительных (несколько месяцев) периодов времени.

The paper describes experience in application of an innovative technique to study the influence of blast operations on deformation of buildings and other constructions with the use of fiber-optic measuring systems. With the help of such systems it is possible to measure deformation of constructions both for short-term (1/300 sec.) and long-term (several months) time periods.

При проведении горных работ на карьерах методом БВР в районах с высокой плотностью населения взрывные колебания причиняют неудобства людям, живущим рядом. За вред, причиненный зданиям (например, трещины в стенах), ответственность часто возлагается на горное предприятие.

До последнего времени влияние взрывных работ на здания и сооружения оценивалось с помощью измерения вибраций. Так как подобные измерения производились только в момент производства взрывных работ, они не могли дать оценки долгосрочного развития повреждений строительных конструкций. Для оценки долговременного влияния взрывных работ на здания впервые была применена оптоволоконная измерительная система, с помощью которой могут быть одновременно измерены деформации конструкции в течении коротких (1/300 с) и длительных (несколько месяцев) периодов времени. В данной статье описывается опыт применения для измерения деформаций зданий оптоволокна Брагга.

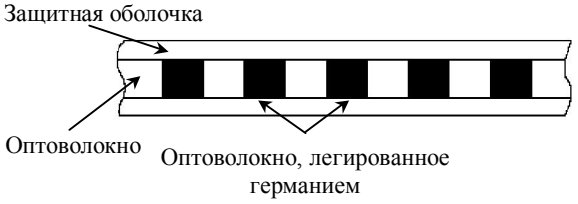


Рис.1. Схема оптоволоконного кабеля Брагга

Для сравнения двух технологий проведения измерений параллельно измерениям долговременных деформаций с помощью оптоволокна были проведены измерения вибраций по DIN 4150/3. В нормативе DIN 4150/3 для жилых зданий допускаются вибрации со скоростью 5-15 мм/с при частоте колебаний 10-50 Гц. В различной технической литературе часто допускаются несколько большие величины между 12,5-50 мм/с [1, 2, 9].

В 1978 г. была открыта светочувствительность оптоволоконных кабелей с примесью германия. При облучении оптоволокна ультрафиолетом в ядре волокна появляются области с долговременно измененным коэффициентом преломления. Ширина сегментов в большинстве случаев постоянна. Снаружи кабель покрывается защитной оболочкой (рис.1) [3].

При прохождении по световоду излучения широкого спектра часть света отражается от сегмента. На определенной длине световода $\lambda_в$ создается сильное отражение. Условие отражения (условие Брагга) определяется как [4]:

$$\lambda_в = 2n_{eff}\Lambda. \qquad (1)$$

Длина волны $\lambda_в$ отраженного света равна произведению среднего коэффициента преломления n_{eff} и расстояния между сегментами в кабеле Λ. Коэффициент преломления изменяется в зависимости от температуры. На расстояние между сегментами влияют температурное расширение, растяжение или сжатие кабеля. Для растяжения кабеля справедливо следующее [3]:

$$\varepsilon = \frac{1}{(1-p_e)}\left[\frac{\Delta\lambda_{â}}{\lambda_{â}} - (\alpha+\xi)\Delta T\right], \qquad (2)$$

где ε – деформация; $\Delta\lambda_в$ – измеренное изменение длины; ξ – термо-оптический коэффициент; p_e – константа фотоэластичности; α – температурный коэффициент стекловолокна; ΔT – измеренное изменение температуры.

Из уравнения (2) видно, что изменение длины волны под влиянием температуры, искажающее результаты измерения, должно быть компенсировано дополнительным измерением температуры.

Преимущества метода измерения деформации с помощью оптоволокна Брагга перед традиционными методами [7]:

- долговременная устойчивость;
- в течение всего времени проведения измерений не трубуются коррекция и техобслуживание аппаратуры;
- могут быть замерены частоты > 10 кГц;
- сенсоры просты в применении и отличаются малыми размерами и малым весом;
- сенсоры нечувствительны к радиации и электромагнитным полям;
- так как демпфирование сигнала не происходит, расстояния между сенсорами и измерительной аппаратурой могут составлять несколько километров без потери точности измерений;
- сенсоры могут быть установлены каскадом.

Каменный карьер находится на севере федеральной земли Саксония (ФРГ). С 1991 г. объем добычи граувакка составляет 500 тыс.т в год. Этот материал в основном используется в дорожном строительстве. Порода отбивается с помощью эмульсионного взрывчатого вещества. Погрузка и транспортировка породы к дробилке осуществляется с помощью экскаваторов и самосвалов. За время измерений было проведено 10 взрывов. При этом было отбито от 7100 до 30600 т граувакка с использованием 2,5-12 т взрывчатого вещества [5].

Измерения были проведены внутри детской комнаты жилого дома. Эта комната находится на ближней к карьеру стороне дома. Прибор для измерения вибраций был установлен на полу. Оптоволоконный кабель Брагга был наклеен непосредственно на одну из трещин в штукатурке для измерения фактического раскрытия трещины в течении времени.

Места проведения взрывов удалены от объекта исследований на 800-820 м. Между местом проведения взрывных работ и объектом исследований находятся 5-метровая звукозащитная стена, лесополоса протяженностью около 100 м, поле и автодорога.

Факторы, приводящие к трещинообразованию или другим повреждениям, чаще всего наслаиваются друг на друга, поэтому точно установить определенный фактор, приведший к разрушению конструкции, не представляется возможным. При установлении факторов, приведших к трещинообразованию, основная цель – найти причину, оказывающую наибольшее влияние на разрушение конструкции. На рис.2 приведен обзор разрушающих факторов.

При проведении взрывных работ 20.08.2004 были проведены замеры вибраций по DIN 4130/3. При этом было отбито 30600 м^3 граувакка с использованием 11,4 т взрывчатого вещества [5]. Замеры показали максимальные вибрации 0,9 мм/с при частоте 31 Гц в вертикальном направлении [6]. Вибрации были субъективно ощутимы.

Измеренные скорости колебаний 0,9 мм/с находятся ниже области 5-15 мм/с, указанной в DIN 4150/3, что в соответствии с немецкими нормативами (DIN) не ведет к уменьшению срока службы здания.

Величина раскрытия трещин внутри жилого дома измерялась с 24.06.2004 по 23.02.2005 с интервалом 10 мин (рис.3).

Максимальная величина раскрытия трещин за время наблюдения составила



Рис.2. Обзорная схема факторов, влияющих на расширение трещин

примерно 200 мкм (0,2 мм) – это величина, заметная невооруженным глазом. При этом раскрытие трещин меняется циклично. За время наблюдений выяснилось, что величина раскрытия трещин в течение дня не является константой, а меняется по синусоиде. Максимальное раскрытие наблюдалось между 12 и 13 часами осенью и между 7 и 8 часами зимой. Минимальное раскрытие независимо от времени года наблюдалось между 23 и 1 часами. Разница между максимальными и минимальными значениями составляла 20-50 мкм.

Период цикла составлял приблизительно 24 ч. Это время независимо от колебаний, обусловленных сменой времени года. В зимнее время колебания в течение суток были менее выражены. Из анализа измерений видно, что температурные колебания имеют выраженное влияние на раскрытие трещин.

Во время проведения взрывов измерения раскрытия трещин производились с частотой 300 Гц (т.е. производилось 300 измерений раскрытия трещин в секунду). Таким образом, даже мельчайшие кратковременные измерения были зафиксированы. На рис.4 показано измерение 20.08.04.

До и после взрыва величина раскрытия трещин примерно одинакова. На отметке 1 с вибрации конструкции, обусловленные взрывными работами, четко выражены, при этом амплитуда колебаний раскрытия трещин достигала 20 мкм. После затухания взрывных колебаний раскрытие возвращалось к примерно постоянному значению. После взрыва раскрытие трещин увеличивалось приблизительно на 6 мкм (0,006 мм). Эта величина существенно превышает погрешность при измерении (0,5 мкм), что позволяет сделать заключение, что взрывные работы оказывают влияние на раскрытие трещин. Все же увеличение раскрытия трещин в результате взрывных работ составляет мельчайшие доли миллиметра. По сравнению с температурными колебаниями, достигающими 50 мкм, влияние взрывных работ несущественно. Часть взрывов не оказала никакого влияния на раскрытие трещин [8].

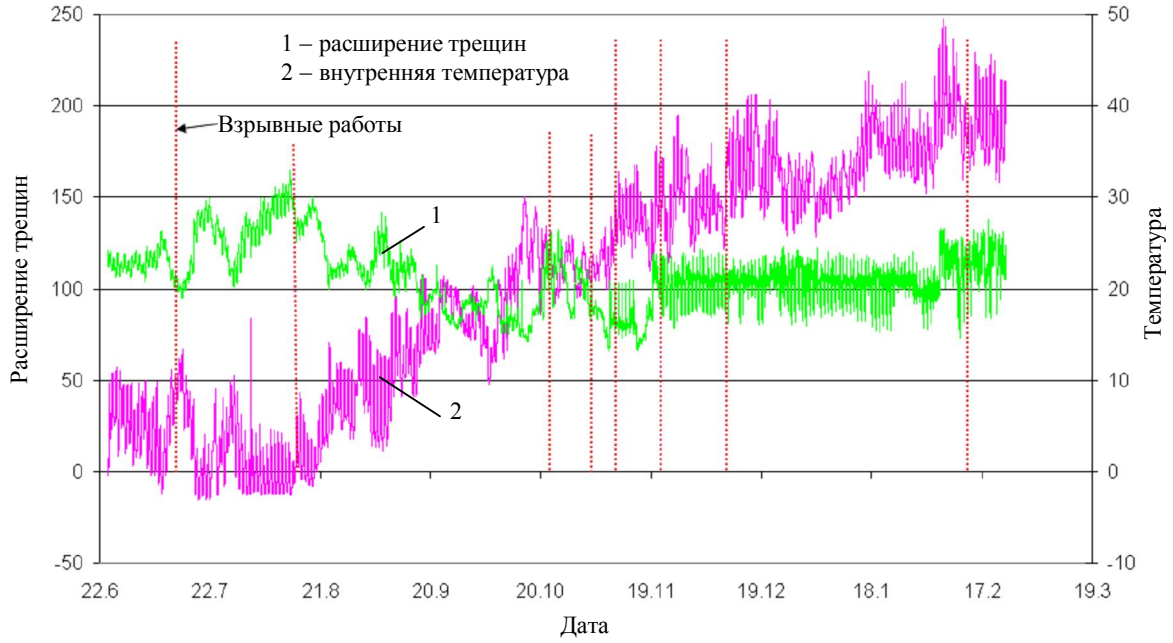


Рис.3. Тенденции в динамике трещин и внутренняя температура

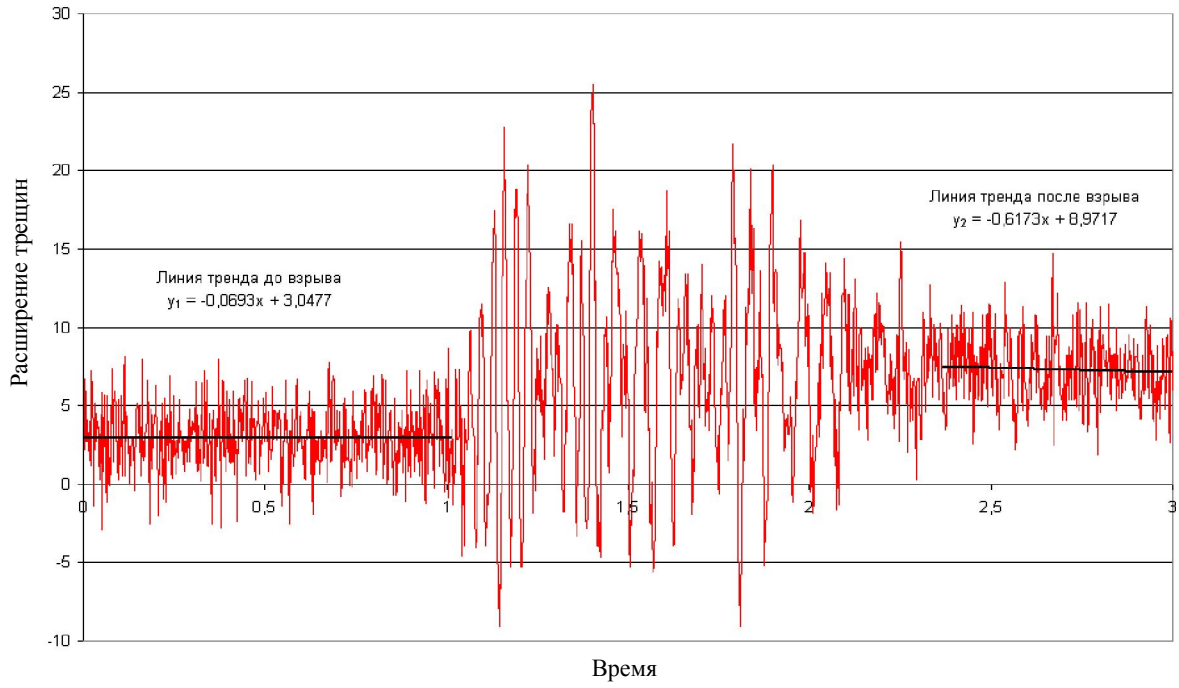


Рис.4. Динамика трещин во время проведения взрывных работ 20.08.04

Во время взрыва 12.07.04 трещина увеличилась только на 0,5 мкм (тоже в пределах погрешности). При обоих взрывах было использовано одно и тоже количество ВВ, в том числе приходящееся на каждую ступень замедления. Так как направление детонации может влиять на раскрытие трещин в здании, была исследована последовательность взрывания и геологические факторы.

Геологические данные показали, что направление распространения детонации и простирание геологических трещины параллельны. Очевидно, что если направление детонации перпендикуларно к простиранию

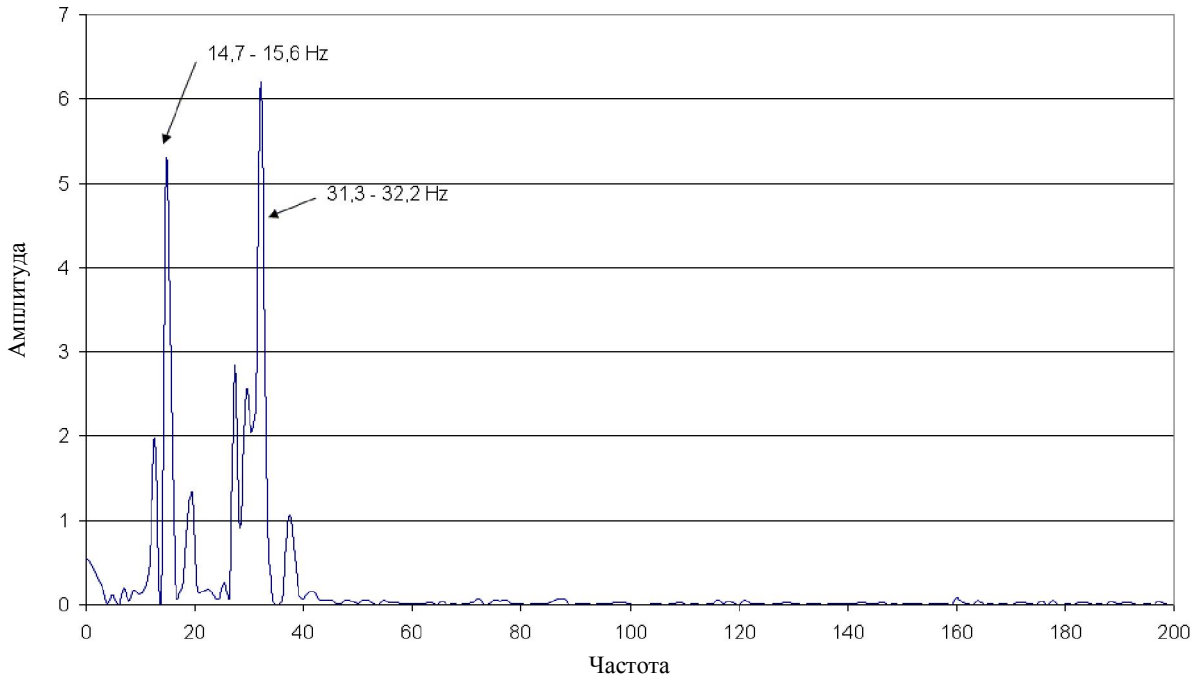


Рис.5. Спектр частот колебаний при взрывных работах 20.08.04

геологических трещин, то на здание передается меньше вибрации.

Для дальнейшего исследования картины колебаний данные были подвергнуты спектральному анализу амплитуды колебаний с целью наблюдения за частотами колебаний во время взрывных работ. Результаты анализа представлены на рис.5.

Исследования показали два максимальных значения амплитуды колебаний при частотах 14,7-15,6 и 31,3-32,2 Гц. При этом амплитуда колебаний с частотой 31,3-32,2 Гц имеет большее значение, что и было подтверждено при вибрационных исследованиях. Частоты выше 150 Гц могут быть приняты как шум и исключены из результатов исследования. Можно заметить, что частоты изменения раскрытия трещин на рис.4 (замеренные в горизонтальном направлении) могут быть лишь условно сравнены с вибрационными измерениями (вертикальное направление). Опыт проведения исследования показал, что новая система имеет неоспоримые преимущества перед традиционными методами, так как позволяет измерить гораздо более широкий спектр частот колебаний.

Было доказано, что взрывные работы на карьере оказывают очень малое влияние на величину раскрытия трещин. Поэтому дополнительно было исследовано влияние на раскрытие трещин следующих факторов [8]:

- внутренней температуры в здании;
- внешней температуры;
- температурного градиента;
- сейсмических факторов;
- солнечного излучения.

При этом была обнаружена четкая зависимость между величиной раскрытия трещин и внешней температурой воздуха (рис.6)

Рис.6 показывает, что в конце 33-й календарной недели, несмотря на падение внешней температуры, ширина трещины все же увеличивалась. При анализе этих результатов должны учитываться два различных аспекта.

С одной стороны, трещина увеличивается с ростом внешней температуры в течение дня, что особенно заметно в летнее время. Это указывает на корелляцию теоретических выводов и результатов замеров. Осенью корелляция выражена заметно слабее, зимой же практически совсем пропадает. Это вполне закономерно, так как величины расширения и сжатия зависят от температуры.

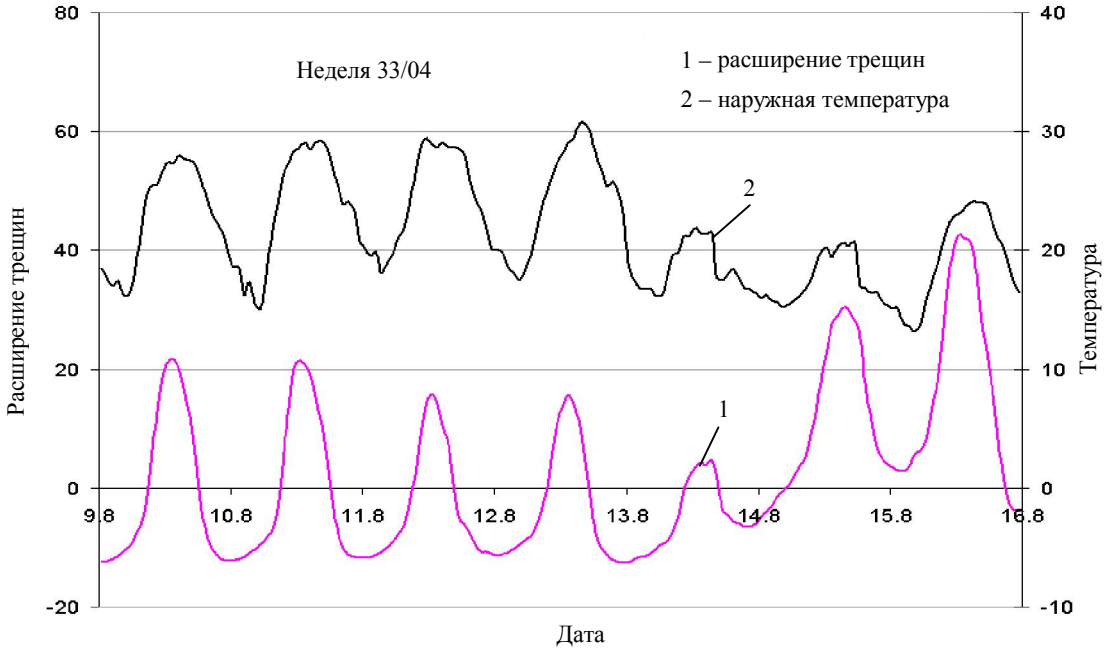


Рис.6. Динамика трещин и наружная температура

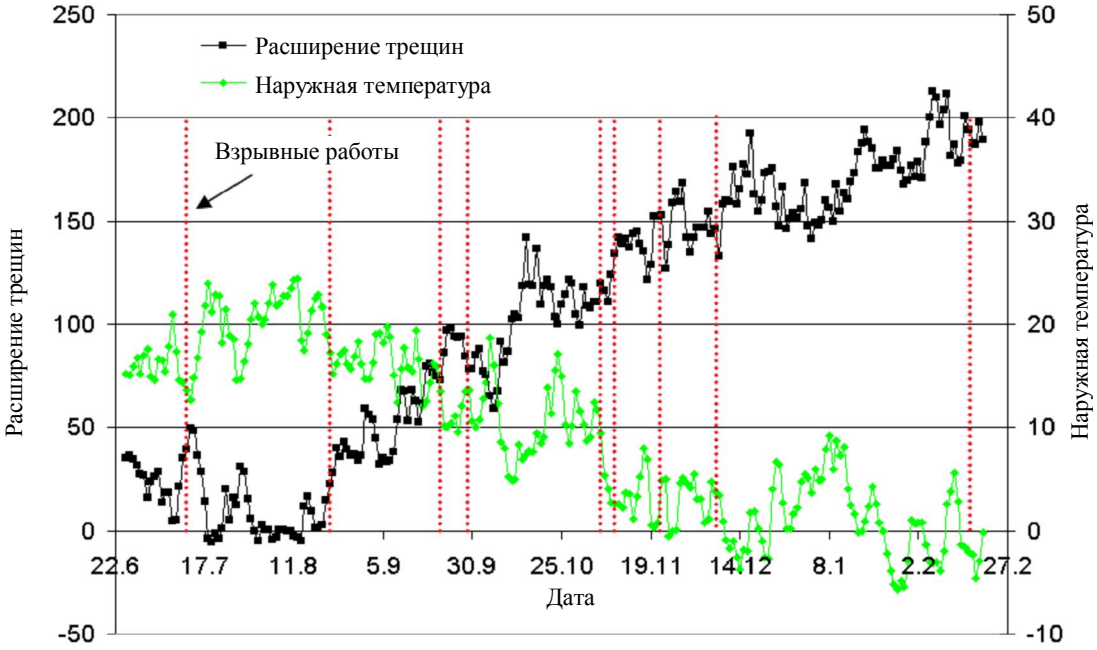


Рис.7. Динамика трещин и наружная температура за все время проведения исследований

С другой стороны, заметно, что в периоды, когда внешняя температура резко падает, трещина остается по-прежнему раскрытой. Это указывает на негативную корелляцию обеих величин.

Эти противоположные зависимости двух величин указывают на необходимость изолированного наблюдения колебания ширины трещины в течение суток. Результаты наблюдений колебания ширины трещины в течение суток были приведены к среднему значению (рис.7).

С середины августа до середины сентября особенно заметно, что при падающей внешней температуре трещина продолжает увеличиваться. Было бы логично предполо-

жить, что при падающей внешней температуре трещина должна закрываться, как это происходило в октябре и начале января. Для описания взаимосвязи двух данных величин была построена диаграмма зависимости ширины трещины от внешней температуры воздуха (рис.7). При этом коэффициент корреляции составлял $R^2 = 0{,}90$. Причиной незначительного рассеивания результатов может служить погрешность при измерениях (точность измерений 0,5 мкм).

С помощью краткосрочных измерений было установлено, что взрывные работы могут оказывать влияние на раскрытия трещин. Поэтому в ходе долговременных испытаний (см. рис.3) было проверено, оказывают ли взрывные работы влияние на долговременные тенденции в динамке трещин (см. таблицу).

Взрывные работы

Дата	Величина заряда, кг	Изменение величины трещины	Изменение температуры
12.07.2004	11858	Увеличение	Уменьшение
20.08.2004	11400	Увеличение	Уменьшение
21.10.2004	1700	Уменьшение	Увеличение
21.10.2004	1600		
29.10.2004	12100	Уменьшение	Увеличение
04.11.2004	2500	Увеличение	Уменьшение
09.11.2004	3200	Без изменений	Без изменений
23.11.2004	5900	Увеличение	Увеличение
07.12.2004	7900	Уменьшение	Без изменений
15.02.2005	4800	Уменьшение	Без изменений

При анализе данных прямой взаимосвязи между взрывными работами и увеличением трещин выявлено не было.

Выводы

На каменном карьере добыча производится методом буровзрывных работ. Сотрясение земли под влиянием взрывных работ вызывает недовольство местного населения. Одна из жалоб была обусловлена разрушением жилого здания из-за вибраций, вызванных очистными работами на карьере. Для выяснения взаимосвязи между разрушением здания и взрывными работами на карьере были проведены исследования.

В ходе исследований были замерены вибрации по нормативу DIN 4150/3. Результаты измерений показали, что в соответствии с немецкими нормативами взрывные работы не ведут к уменьшению срока службы здания.

С другой стороны, с помощью оптоволокна Брагга была исследована динамика раскрытия трещин в здании в ходе краткосрочных и долгосрочных замеров. Краткосрочные замеры показали, что взрывные работы оказывают влияние на величину раскрытия трещин, но это влияние настолько незначительно, что не идет в сравнение с колебаниями трещин под влиянием смены наружной температуры в течение суток. В ходе долгосрочных измерений влияния взрывных работ на раскрытие трещин выявлено не было. При этом был определен наиболее сильно влияющий на раскрытие трещин фактор – наружная температура воздуха. Это не означает, что именно изменение температуры повлекло за собой появление трещин. Появлению трещин способствовало совместное действие разрушающих факторов, так же эти факторы являются причиной знакопеременного движения трещин в течение времени.

ЛИТЕРАТУРА

[1] *Chen G.*, *Huang S.L.*: Analysis of ground vibrations caused by open pit production blasts; Explosives and blasting techniques, 2000. Balkema, ISBN 90-5809-168-6.

[2] *Person P.-A.*, *Holmberg R.*, *Lee J.*: Rock blasting and explosives engineering; CRC Press 1994, ISBN 0-8493-8978-X.

[3] *Klink*, *T.*, *Meißner*, *J.*, *Solwik*, *V.*: Dehnmessung an einer Spannbetonbrücke mit Faser-Bragg-Sensoren, Bautechnik 74 (1997) Heft 6, Seite 401-405.

[4] *Habel*, *W.*: Faseroptische Dehnungsaufnehmer für hochauflösende Verformungs- und Reparaturmessungen, Tagungsband Gesa'96, 1996.

[5] *Vogel*, *G.*: Sprengtechnische Daten Steinbruch 19.08.04 – 15.02.05.

[6] Schwingungsmessung durch das Sächsische Oberbergamt.

[7] Данные ЗАО «AOS», Дрезден, Германия.

[8] *Дребенстедт*, *К.*, *Песслер*, *С.*: Untersuchungen zu den Auswirkungen von Sprengerschütterungen auf Gebäude mit Hilfe von Faser-Bragg-Gittern, Отчет, 2005.

[9] *Singh*, *P.K.*, *Vogt*, *W.*, *Singh*, *D.P.*, *Roy*, *P.P.*: Prediction and control of ground vibration in a dolomite quarry in India, Braunkohle – Surface Mining 48 (1996) Nr. 4, ISSN 1431-2719.