

05

## Диагностика потери устойчивости нагруженных конструкций и развитие очагов разрушения при воздействии сейсмозрывных и ударных воздушных волн

© Х.Ф. Махмудов,<sup>1</sup> М.Г. Менжулин,<sup>2</sup> М.В. Захарян,<sup>2</sup> У. Суллонов,<sup>3</sup> З.М. Абдурахманов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Национальный минерально-сырьевой университет „Горный“,  
199106 Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Худжандский государственный университет им. акад. Б. Гафурова,  
735700 Худжанд, Республика Таджикистан  
e-mail: h.machmoudov@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 8 октября 2014 г. В окончательной редакции 25 марта 2015 г.)

Представлено решение актуальной для горнодобывающих предприятий задачи — прогнозирование снижения прочности элементов конструкций охраняемых зданий и сооружений при производстве взрывных работ на основании коэффициента концентрации напряжений, продолжительности времени превышения предела длительной прочности на растяжение и скорости роста трещин.

Показано, что наличие концентраторов напряжений в виде естественных неоднородностей или дефектов в строительных материалах отдельных элементов зданий, подвергшихся воздействию сейсмозрывных и ударных воздушных волн, приводит к росту трещин. Для нахождения величины поверхностной энергии установлено распределение трещин в образцах исследуемого материала и определена их прочность на растяжение. Из распределения трещин по размерам получена эффективная длина трещины.

### Введение

Разрушение горных пород [1–7] и строительных материалов [8–17] в большинстве случаев связано с концентрацией напряжений [18–24] в местах скопления дефектов (трещин) [25–35]. Наличие этих дефектов, подвергающихся опасному воздействию при производстве массовых взрывов и дроблении негабарита, приводит к их развитию, даже в случае соблюдения требований Единых правил безопасности при взрывных работах или требований по максимальной скорости смещения [19]. В настоящее время на карьерах Ленинградской обл. по добыче строительного камня рост добываемого сырья сопровождается увеличением массы одновременно взрываваемых зарядов взрывчатых веществ как при массовых взрывах, так и при вторичном дроблении негабаритов. Ввиду интенсивности развития горных работ и приближения границ карьера к охраняемым объектам, проблема опасного воздействия взрыва на прилегающие здания и сооружения на данный момент стоит весьма остро. Несмотря на выполнение требований безопасности [19] при производстве взрывных работ и на многообразии существующих технологий снижения уровня динамического воздействия, в охраняемых объектах, находящихся вблизи производства взрывных работ, отмечается тенденция к появлению разрушений и развитию нарушений в отдельных элементах зданий и сооружений [36–42]. Проблемой снижения опасного воздействия взрывов на охраняемые здания занимались такие ученые, как М.А. Садовский, В.В. Адушкин, Е.И. Шемякин, и многие другие.

В то же время не решены многие практические задачи формирования и развития трещин в зданиях и сооружениях при воздействии на них сейсмозрывных (СВВ) и ударных воздушных волн (УВВ).

Анализ панельных жилых зданий в поселке Гаврилово, расположенных в зоне взрывных работ, а также оценка снижения прочностей исследуемых элементов конструкций показали, что существующие методы оценки воздействия взрывов на здания и сооружения по предельным значениям массовых скоростей в сейсмических волнах и давлений на фронте УВВ от проводимых на карьерах взрывных работ не достаточны, так как они не учитывают распределение естественных трещин в несущих элементах конструкций [26,33]. Таким образом, для сохранности зданий и сооружений от воздействия СВВ и УВВ необходимо учитывать продолжительность времени превышения предела длительной прочности на растяжение и оценить текущую характеристику роста трещин с учетом коэффициента концентрации напряжений и естественных дефектов материала конструкций [43].

### Методы исследований

— Аналитическое исследование процессов разрушения твердых тел при наличии концентраторов напряжений и распространении трещин.

— Определение прочности исследуемых материалов в зависимости от концентрации напряжений на прессе ЦДМ-2.5 и приборе ИСМ-190.

— Определение распределения трещин по размерам в исследуемых материалах на микроскопе.

— Определение скорости распространения продольных волн дефектоскопом Бетон-32.

— Регистрация параметров СВВ и УВВ, воздействующих на здания, сейсмостанцией Blastmate III и цифровым осциллографом Tektronix.

— Определение скорости роста трещин в образцах строительных материалов методом регистрации времени разрыва тонких токопроводящих слоев.

## Снижение прочности кладочного материала в элементах зданий под действием растягивающих напряжений

Для прогнозирования снижения прочности элементов конструкций была разработана методика, учитывающая прочностные свойства строительных материалов при известных параметрах воздействия, на основе оценки характеристики роста начальной трещины определенных размеров, приводящей к развитию магистральных трещин.

Важно отметить, что предел прочности монолитного материала, определяемый ГОСТом, на порядок превосходит напряжения в типичных для данных условий воздействия СВВ и УВВ, но фактическое качество материалов, используемых при строительстве зданий, и их нынешнее состояние существенно отличаются от проектных значений в сторону уменьшения. Для количественной оценки снижения прочности были проведены исследования влияния концентраторов напряжений на прочность строительных материалов. Разработка аналитического метода прогнозирования разрушения при наличии концентраторов напряжений или повышенных напряжениях является основной задачей анализа разрушения с неоднородностями и надрезами. Основные подходы к прогнозированию развития концентраторов напряжений заключаются во введении коэффициента концентрации напряжений. Для проверки возможности оценки прочности в условиях наличия концентратора напряжений или естественных дефектов были отобраны образцы неправильной формы из строительных материалов — бетона плиты и бетонной закладки (кладочного раствора между плитами) из исследуемого здания. По результатам измерений отобранных образцов определялась их плотность (для бетона плиты —  $2109 \text{ kg/m}^3$ , закладки —  $2052 \text{ kg/m}^3$ ), а с помощью ультразвукового дефектоскопа Бетон-32 — скорость распространения продольной волны (для бетона плиты —  $4696 \text{ m/s}$ , закладки —  $2865 \text{ m/s}$ ). Поверхностная энергия по Гриффитсу определится из следующего выражения [22,23]:

$$\gamma_s = \frac{\sigma_p^2 \pi (1 - \nu^2) l_{\text{eff}}}{2E}, \quad (1)$$

где  $\sigma_p$  — прочность образцов на растяжение, Па,  $E$  — модуль Юнга, Па,  $\nu$  — коэффициент Пуассона,

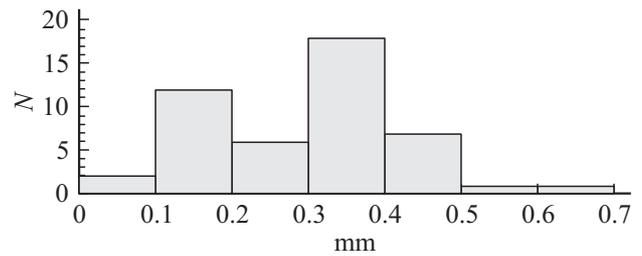


Рис. 1. Распределение трещин по размерам (количество дефектов  $N$ , размер дефекта в мм) для бетонной закладки.

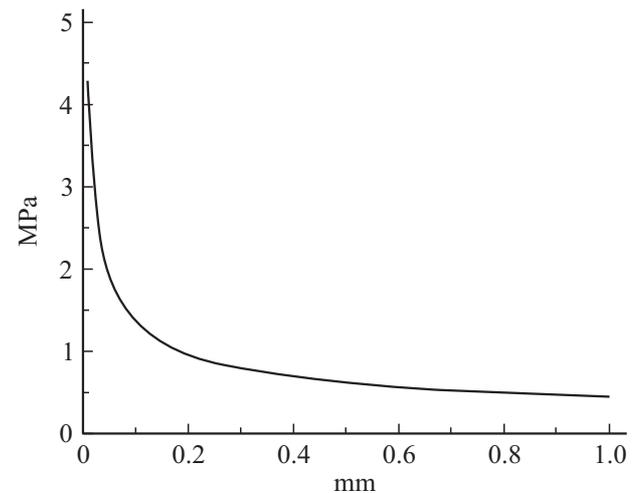
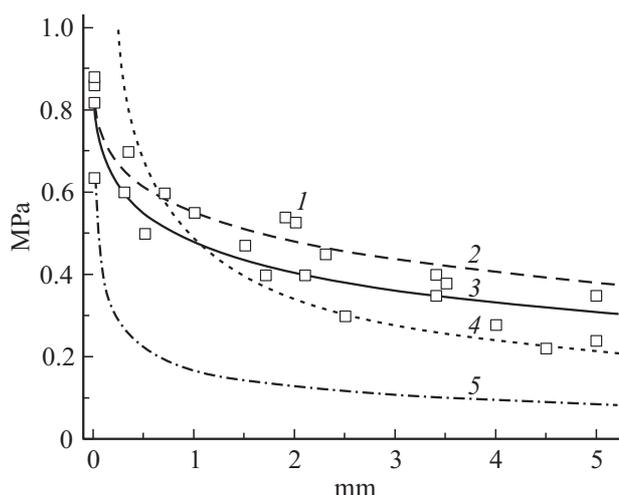


Рис. 2. Зависимость прочности бетонной закладки на растяжение от размера дефекта по Гриффитсу (предел прочности МПа, размер дефекта в мм).

$l_{\text{eff}}$  — эффективная длина микротрещины (наиболее распространенный размер трещины), м. Размер эффективной длины микротрещины в разрушаемых образцах определялся на основе графического анализа распределения трещин по размерам (рис. 1). Зависимость изменения прочности на растяжение бетонной закладки  $\sigma^*$  от размера трещины  $l_{\text{eff}}$  (рис. 2) имеет вид

$$\sigma^* = 0.43 \sqrt{\frac{1}{l_{\text{eff}}}}. \quad (2)$$

Определив такие физико-механические свойства строительных материалов в зданиях, как прочность на растяжение однородного образца, динамические упругие показатели и распределение трещин, можно прогнозировать снижение прочности и, как следствие, снижение сейсмостойкости зданий и сооружений. Для оценки надежности расчета коэффициента концентрации напряжений при наличии видимых трещин предлагается сравнивать экспериментальные данные с классическими теоретическими подходами. Прочность материала с учетом коэффициента концентрации напряжений для неоднородной хрупкой среды может быть определена по



**Рис. 3.** Зависимости прочности (МПа) бетонной закладки от глубины концентратора (mm): 1 — экспериментальные значения, 2 — формула Нейбера для гиперболического надреза, 3 — формула Вейса с учетом неоднородности материала, 4 — формула Ирвина, 5 — формула Нейбера для тонкой трещины Гриффиста.

формуле Вейса [22]

$$\sigma_{NF} = \frac{\sigma_F}{K_b \cdot K_t} \frac{(1 + 4b/\rho)^{3/2} - 1}{6b/\rho}, \quad (3)$$

где  $K_b = 1 + 2(a_b/\rho_b)^{1/2}$  — коэффициент концентрации напряжений для эллиптических трещин,  $K_t$  — коэффициент концентрации напряжений для трещины Гриффиста,  $a_b$  — размер трещины, mm,  $\rho_b$  — эллиптический радиус трещины, mm,  $b$  — среднее расстояние между трещинами, mm,  $\rho$  — радиус в вершине концентратора, m.

$$\sigma_{NF} = \frac{\sigma_F}{(1 + 2(l/2\eta)^{1/2}) \cdot (1 + 2(a_b/\rho_b)^{1/2})} \times \frac{(1 + 4b/\rho)^{3/2} - 1}{6b/\rho}, \quad (4)$$

где  $\eta$  — размер эквивалентной частицы, mm. Для определения величины  $\eta$  необходимо использовать предел прочности монолитного образца и предел прочности образца с концентратором известного размера. Размер эквивалентной частицы определим из следующего выражения:

$$\eta = 2l \left( \frac{\sigma_{NF}}{\sigma_F - \sigma_{NF}} \right)^2, \quad (5)$$

где  $\sigma_F$  — предел прочности монолитного образца, Pa,  $\sigma_{NF}$  — прочность образца с концентратором известного размера, Pa. Для закладки:  $\sigma_F = 0,85$  МПа,  $\sigma_{NF} = 0,55$  МПа при  $l = 1$  mm,  $K_b = 3.45$  с учетом того, что  $a_b = 0.3$  mm,  $\rho_b = 0.2$  mm. При  $b = 1$  mm и  $\rho = 0.25$  mm зависимость прочности бетонной закладки с концентратором известного размера примет вид

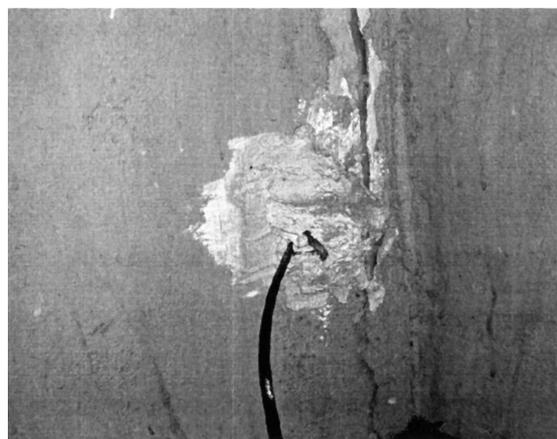
$$\sigma_{NF} = \frac{0.85}{1 + 2\sqrt{l/6.62}}. \quad (6)$$

На представленном графике (рис. 3) при сравнении с классическими расчетными подходами значений прочности, полученной при разрушении отобранных образцов закладки с нанесенными концентраторами напряжений, видно, что приведенная выше зависимость (3) с учетом неоднородности материала хорошо описывает экспериментальные значения и позволяет спрогнозировать предел прочности на растяжение при известных параметрах концентраторов напряжений.

### Определение характеристики роста начальной трещины от воздействия СВВ и УВВ на элементы конструкций зданий

Мониторинг панельных жилых зданий в поселке Гаврилово Ленинградской обл. со сроком эксплуатации 30–50 лет показал, что в местах стыков панелей образуются трещины, осыпается штукатурка, происходит разрушение самих панельных блоков и раскрытие трещин через маяки. Была проведена серия натурных измерений (в жилых зданиях по адресу: пос. Гаврилово, ул. Школьная, дом 6) параметров СВВ и УВВ, распространяющихся от массового взрыва и дробления негабаритов, с помощью регистрирующего комплекса Blastmate III производства фирмы Instancel и осциллографа Tektronix 3034B.

Регистрирующая аппаратура располагалась на фундаменте здания и на площадке между 4-м и 5-м этажами. На стене 5 этажа здания располагался датчик скорости GS-20DX, ориентированный для измерения колебаний нормально к распространению трещины в здании (рис. 4). В вершине трещины устанавливались два тензодатчика типа „Сатурн“ для измерения динамики раскрытия трещины при воздействии взрывных работ (рис. 5). Полученные при измерениях на фундаменте параметры СВВ, распространяющиеся от массового взрыва, находились в пределах допустимой нормы для данного типа



**Рис. 4.** Датчик скорости GS-20DX.

## Параметры буровзрывных работ

Взрывы	Параметры											
	БВР, kg		$\sigma^*$ , МПа	$t$ , $\mu s$			$\Delta l$ , mm			$l_H$ , mm		
				Расчетная	Эксперимент	Расчетная	Эксперимент					
1	100		0.14	35	130	0.3	1.3			50		
2	1000		0.13	60	160	0.5	3			57		
№	Допустимая скорость колебания грунта, см/с			Грунт $\sigma$ , МПа			Преломления СВВ на фундамент $\sigma$ , МПа			$\sigma^8$ , МПа		
	Класс сооружения											
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
I	4.60	7.50	12.00	7.99	13.03	20.85	3.40	5.55	8.88	7.5	9	12.5
II	2.80	4.60	7.50	4.86	7.99	13.03	2.07	3.40	5.55	7.5	9	12.5
III	1.60	2.80	4.60	2.78	4.86	7.99	1.18	2.07	3.40	7.5	9	12.5
IV	1.00	1.60	2.80	1.74	2.78	4.86	0.74	1.18	2.07	7.5	9	12.5
V	0.60	1.00	1.60	1.04	1.74	2.78	0.44	0.74	1.18	7.5	9	12.5
VI	0.30	0.60	1.00	0.52	1.04	1.74	0.22	0.44	0.74	7.5	9	12.5

здания. Но при колебании конструкции под воздействием УВВ, распространяющихся от дробления негабаритов, было зарегистрировано превышение локального предела прочности на растяжение, зафиксированного по радиальной составляющей датчиком скорости. Параметры буровзрывных работ (далее БВР), результаты измерений и степень воздействия напряжений, возникающих при преломлении СВВ на материал и конструкцию фундамента, для данных взрывов указаны в таблице. Классификация сооружений по предельно допустимым напряжениям, возникающим в основании при преломлении СВВ (см. таблицу), позволяет качественно оценить степень воздействия напряжений, возникающих при преломлении СВВ, на материал и конструкцию фундамента, в соответствии с классом сооружения. Тензодатчиками было зафиксировано колебание берегов трещины с амплитудой до 0.2 mm и гистерезис (приращения ширины раскрытия) в 0.02 mm в первой серии и с амплитудой в 0.16 mm и гистерезисом в 0.03 mm во второй серии. В момент фиксирования параметров была высокая

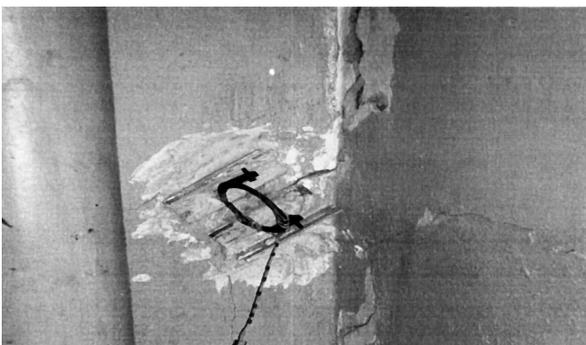


Рис. 5. Тензодатчик № 1 типа „Сатурн“.

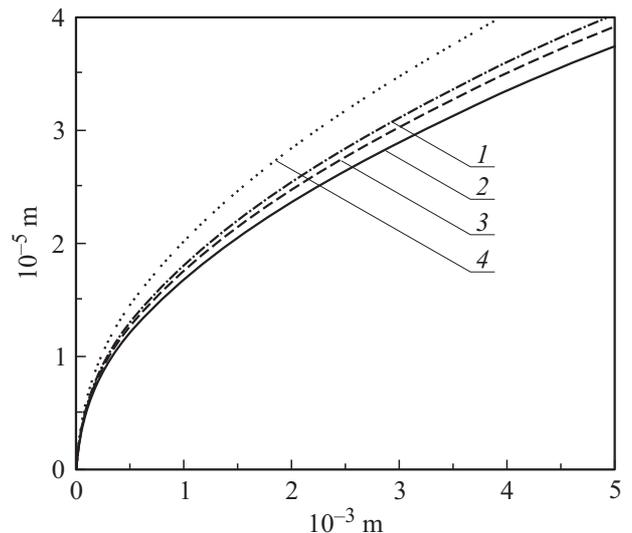


Рис. 6. Зависимости приращения раскрытия трещин ( $10^{-5}$  м) от приращения ее длины ( $10^{-3}$  м): для начальной трещины длиной: 1 — 0.1 м, 2 — 0.01, 3 — 0.05, 4 — 0.5 м.

инверсионная стратификация атмосферы, что является благоприятным условием для распространения мощных ударных возмущений. Длина приращения трещины при известной ширине раскрытия определяется формулой Ирвина [22,23]

$$l = \frac{(Ev)^2}{(2K_t/\pi)(1-v^2)}. \quad (7)$$

Приращение ширины раскрытия трещины составит

$$v = \frac{1}{E} \sqrt{l \left( 0.63 + 1.27 \left( \frac{l_k}{6.62} \right) \right) \cdot (1-v^2)}. \quad (8)$$

График зависимости приращения раскрытия трещины от приращения ее длины при различной начальной длине  $l_k$  трещины представлен на рис. 6. Таким образом, для первой серии приращение длины составило 1.3 мм, а для второй серии — 3 мм. При воздействии УВВ от дробления негабарита накладными зарядами продолжительность времени превышения предела длительной прочности на растяжение  $t$  определяется из осциллограмм (рис. 7, 8), полученных при измерении колебания стен здания на 5 этаже датчиком скорости.

Условием роста трещины является превышение предела длительной прочности на растяжение материала под действием соответствующей составляющей волны напряжений. Из этого условия находим время, в течение которого будет превышен предел прочности (рис. 9). Для определения длины трещины  $l$ , до которой прорастет  $l_H$ , необходимо найти  $\bar{l}$  [5]

$$\bar{l} = \sqrt{\bar{l}(\bar{l} - 1)} + \ln(\sqrt{\bar{l}} + \sqrt{\bar{l} - 1}), \quad (9)$$

где  $\bar{l}$  — приведенная длина трещины. Найдем приведенное время  $\bar{t}$ , зная время воздействия на здания:

$$\bar{t} = \frac{V_{mp}}{l_H} t. \quad (10)$$

Новая длина трещины определится из выражения

$$l = l_H \bar{l}. \quad (11)$$

Для первой серии взрыва  $l_1 = 50.3$  мм, для второй —  $l_2 = 57.5$  мм.

Зависимость времени прорастания  $t(\Delta l)$  от приращения длины трещины  $\Delta l$  определится из выражения [30,36]

$$t(\Delta l) = V_{mp} \sqrt{\ln \left[ \frac{e^{\sqrt{(\Delta l + l_H)\Delta l}}}{\left( \sqrt{\frac{\Delta l + 2l_H}{l_H}} - \sqrt{\frac{\Delta l + l_H}{l_H}} \right)^{l_H}} \right]}, \quad (12)$$

где  $V_{mp} = 200$  м/с — средняя скорость роста трещины (устанавливалась экспериментально методом регистрации разрыва тонких токопроводящих слоев).

Расчетные зависимости показали (рис. 10), что метод оценки снижения прочности от воздействия СВВ и УВВ позволяет спрогнозировать приращение начальной длины трещины, которая учитывает продолжительность времени превышения предела длительной прочности на растяжение и скорости роста трещин. Важно отметить, что зафиксированный рост трещин от воздействия УВВ не исключает влияния СВВ на дальнейшее развитие трещин. При измерениях, проведенных в процессе исследования, параметры СВВ не превышали значений, при которых, согласно разработанной методике, начинается рост трещин.

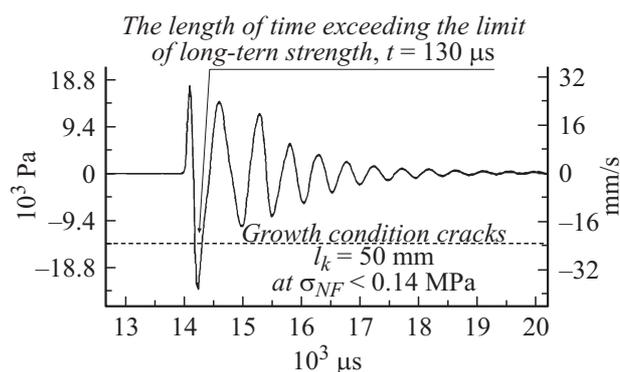


Рис. 7. Осциллограмма, полученная при 1-й серии взрыва (напряжения Pa, время μs, скорость смещения mm/s). Продолжительность времени превышения предела длительной прочности  $t = 130$  μs и условия роста трещины  $L_k = 50$  мм при  $\sigma_{NF} = 0.14$  МПа.

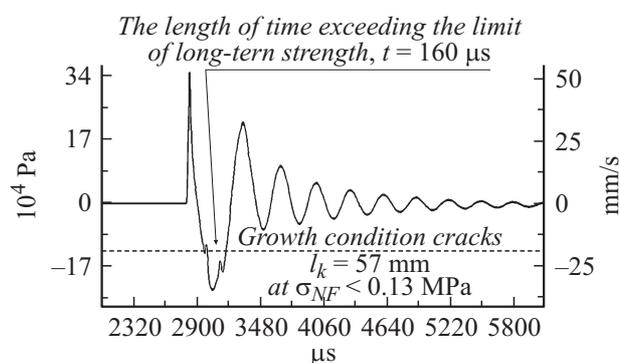


Рис. 8. Осциллограмма, полученная при 2-й серии взрыва (напряжения Pa, время μs, скорость смещения mm/s). Продолжительность времени превышения предела длительной прочности  $t = 130$  μs и условия роста трещины  $L_k = 57$  мм при  $\sigma_{NF} = 0.13$  МПа.

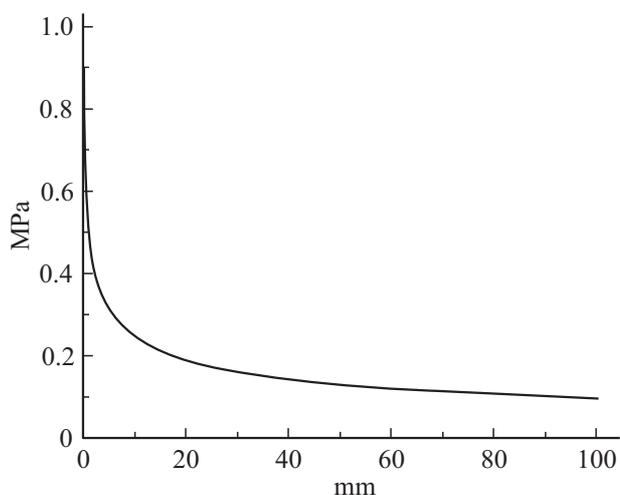


Рис. 9. Зависимость прочности бетонной закладки (MPa) от глубины (mm) концентратора с учетом неоднородности материала.

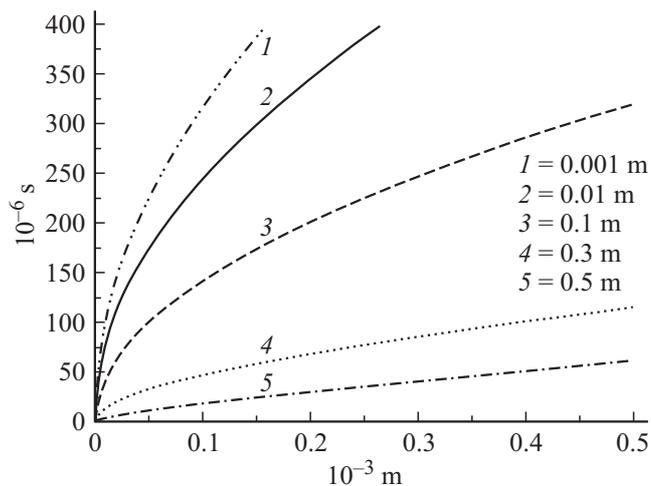


Рис. 10. Зависимость времени прорастания трещины ( $10^{-6}$  с) от приращения длины трещины ( $10^{-3}$  м).

Многочисленное воздействие УВВ при дроблении негабарита накладными зарядами приводит к достижению трещинами размеров, значения которых снижают прочность. В результате обеспечиваются условия для развития трещин, в том числе и от воздействия СВВ, которые одновременно возникают при производстве массовых взрывов с дроблением негабарита. Так, в случае достижения размера трещины в 1 м условием ее роста будет превышение амплитудой радиальной составляющей эпюры волны напряжений значения в 0.1 МПа, что соответствует в данных условиях скорости смещения в 17 мм/с. Незначительное превышение данной величины неоднократно фиксировалось в результате измерений. В свою очередь, развитие трещины в ненарушенных участках возможно при достижении величины растягивающей составляющей волны напряжений в 0.9 МПа (скорости смещения в 160 мм/с), что возможно при неверно выбранных интервалах замедлений при массовом взрыве и, как следствие, сильной раскочки здания.

В результате проведения измерений в пос. Гаврилово, зарегистрированные на фундаменте параметры СВВ находились в пределах допустимой нормы для исследуемого здания. При колебании конструкции от воздействия УВВ, распространяющихся от дробления негабарита, было зарегистрировано превышение локального предела прочности материала на растяжение. Измерены колебания берегов трещины с амплитудой в пределах 0.16–0.2 мм и приращением раскрытия трещины в пределах 0.02–0.03 мм.

## Выводы

Установлены зависимость, позволяющая оценить снижение прочности закладочного материала в элементах зданий под действием растягивающих напряжений от увеличения текущих размеров трещин, и зависимость

приращения длины трещины от продолжительности времени превышения предела длительной прочности на растяжение. Разработана методика прогнозирования снижения прочности отдельных элементов зданий при воздействии на них динамических нагрузок на основании коэффициента концентрации напряжений с учетом распределения естественных трещин. Предложен метод оценки роста трещин в элементах конструкций от воздействия сейсмозврывных и ударных воздушных волн, позволяющий определить приращение начальной длины трещины, который учитывает продолжительность времени превышения предела длительной прочности на растяжение и скорость роста трещин. Для оценки коэффициента концентрации напряжений при наличии видимых трещин проведено сравнение экспериментальных данных с классическими теоретическими подходами.

Установлена зависимость, полученная при разрушении исследуемых образцов с нанесенными концентраторами напряжений с учетом неоднородности материала, которая позволяет спрогнозировать предел прочности бетонной закладки на растяжение при известных параметрах трещин. Определена скорость роста трещины при разрушении образцов исследуемых материалов методом регистрации временного интервала разрыва тонких токопроводящих слоев.

## Список литературы

- [1] *Соболев Г.А., Пономарев А.В.* // Физика Земли. 2011. № 10. С. 48–63.
- [2] *Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф., Мансуров В.А., Султонов У., Рустамова М.З.* // ФТПРПИ, 2009. № 4. С. 55–59.
- [3] *Carpinteri A., Xu J., Lacidogna G., Manuella A.* // Cement and Concrete Composites. 2012. Vol. 34. N 4. P. 529–537.
- [4] *Садковский М.А., Соболев Г.А.* Физические основы прогнозирования разрушения горных пород при землетрясениях. М.: Наука, 1987. С. 125.
- [5] *Менжулин М.Г., Махмудов Х.Ф., Щербаков И.П.* В книге: Наука сегодня: теория, практика, инновации. Ростов-на-Дону, 2014. С. 159–187.
- [6] *Гульельми А.В., Зотов О.Д., Завьялов А.Д.* // Физика Земли. 2014. № 1. С. 66–74.
- [7] *Менжулин М.Г., Махмудов Х.Ф., Куксенко В.С., Султонов У.* Вестник Тамбовского ун-та. Сер. Естественные и технические науки. 2013. Т. 18. № 4–2. С. 1667–1668.
- [8] *Махмудов Х.Ф., Куксенко В.С., Томилин Н.Г., Бенин А.В.* Вестник Тамбовского ун-та. Сер. Естественные и технические науки. 2013. Т. 18. № 4-2. С. 1909–1910.
- [9] *Pigeon M., Toma G., Delagrave A., Marchand J., Bissonnette B., Prince J.C.* Equipment for the analysis and behavior of concrete under restrained shrinkage at early-ages. Magazine of Concrete Research. 2000. Vol. 52. N 4. P. 297–302.
- [10] *Moon J.H., Weiss W.J.* Estimating residual stress in the restrained ring test under circumferential drying. Journal of Cement and Concrete Composite. 2006. Vol. 28. N 5. P. 486–496.
- [11] *Sancho J.M., Planas J., Cendon D.A., Reyes E., Galvez J.C.* // Eng Fract. Mech. 2007. Vol. 74. N 1–2. P. 75–86.

- [12] *Sancho J.M., Planas J., Fathy A.M., Galvez J.C., Cendon D.A.* // Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech. 2007. Vol. 31. N 2. P. 173–187.
- [13] *Бенин А.В.* Деформирование и разрушение железобетона: аналитические, численные и экспериментальные исследования. СПб.: ПГУПС, 2006. 127 с.
- [14] *Ju Gang Luo et al.* // Appl. Mech. Mater. 2012. P. 188–119.
- [15] *Куксенко В.С., Томилин Н.Г., Махмудов Х.Ф., Бенин А.В.* // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. № 2. С. 31–35.
- [16] *Benin A.V., Semenov A.S., Semenov S.G.* // Advanc. Mater. Res. 2013. Vol. 831. P. 364–369.
- [17] *Суржиков А.П., Фурса Т.В.* // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 4. С. 71–76.
- [18] *Fifolt D.A., Petrenko V.F., Schulson E.M.* // Philosopg. Mag. B. 1993. Vol. 67. N 3. P. 289–299.
- [19] *Бенин А.В.* // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений: Двухмесячный научно-практический журн. ВНИИТПИ. М., 2007. N 3. С. 16–19.
- [20] *Kai Lai Deng et al.* // Appl. Mech. Mater. 2012. P. 188–106.
- [21] *Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф., Манжиков Б.Ц.* // ФТПР-ПИ. 2010. Т. 4. С. 29–40.
- [22] *Гольдштейн Р.В., Ентов В.М.* Качественные методы в механике сплошных сред. М.: Наука, 1989. 224 с.
- [23] *Завойчинская Э.Б., Кийко И.А.* // Введение в теорию процессов разрушения твердых тел. Учебн. пособие. М.: Изд-во МГУ, 2004. 169 с.
- [24] *Брок Д.* Основы механики разрушения. М.: Высшая школа, 1980. 368 с.
- [25] *Лексовский А.М., Губанова Г.Н., Юдин В.Е., Баскин Б.Л.* // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 6. С. 122–127.
- [26] *Кожушко А.А., Синани А.Б.* // ФТТ. 2005. Т. 47. Вып. 5. С. 812–815.
- [27] *Лексовский А.М., Боровиков В.А., Бозоров Н.С., Абдуманов А.А., Синани А.Б., Пилецки С.А.* // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. С. 90–94.
- [28] *Панасюк В.В.* Предельное равновесие хрупких тел с трещинами. Киев: Наукова думка, 1968. 246 с.
- [29] *Партон В.З.* Механика разрушения: От теории к практике. М.: Наука, 1990. 240 с.
- [30] *Партон В.З., Морозов Е.М.* Механика упругопластического разрушения. М.: Наука, 1985. 504 с.
- [31] *Кобелев Н.П., Сойфер Я.М., Гуров А.Ф., Никаноров С.П., Синани А.Б., DeBatist R., Van Humbeeck J.* // ФТТ. 2002. Т. 44. Вып. 1. С. 78–82.
- [32] *Лексовский А.М., Баскин Б.Л.* // ФТТ. 2011. Т. 53. Вып. 6. С. 1157–1168.
- [33] *Хеллан К.* Введение в механику разрушения. М.: Мир, 1988. 364 с.
- [34] *Херцберг Р.В.* Деформация и механика разрушения конструкционных материалов. М.: Металлургия, 1989. 576 с.
- [35] *Черепанов Г.П.* Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.
- [36] Автореф. канд. дис. Захарян М.В. Прогнозирование снижения прочности элементов конструкций при воздействии взрывных нагрузок на здания и сооружения. СПб. 2011. С. 20
- [37] *Махмудов Х.Ф.* // Деформация и разрушение материалов. 2012. № 8. С. 41–45.
- [38] *Betterman L.R., Ouyang C. Shah SP* Fiber-matrix interaction in microfiber-reinforced mortar. Advanced Cement Based Materials. 1995. N 3. P. 53–61.
- [39] *Li V.C., Wang S., Wu C.* Tensile strain-hardening behavior of PVA-ECC. ACI Materials J. 2001. Vol. 98. N 6. P. 483–492.
- [40] *Kentaro O., Masayasu O.* // Construction and Building Materials. 2010. Vol. 24. N 12. P. 2339–2346.
- [41] *Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф., Ильинов М.Д., Абдурахмонов З.М.* Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального ун-та. 2014. № 3 (20). С. 98–108.
- [42] *Козырев А.А., Панин В.И., Савченко С.Н.* и др. Сейсмичность при горных работах / Под ред. Н.Н. Мельникова. Апатиты: КНЦ РАН, 2002. С. 326.
- [43] *Менжулин М.Г., Махмудов Х.Ф., Щербаков И.П.* LAMBERT Academic Publishing. 2014. С. 68.