

УДК 620.178.7

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ПОРОД ПЕСЧАНИКА НА ОСНОВЕ КРИТЕРИЯ ИНКУБАЦИОННОГО ВРЕМЕНИ

А. Н. Мартемьянов*, Ю. В. Петров*,**

* Санкт-Петербургский государственный университет, 199034 Санкт-Петербург, Россия

** Научно-исследовательский институт механики Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского, 603600 Нижний Новгород, Россия
E-mails: st021087@student.spbu.ru, y.v.petrov@spbu.ru

С использованием критерия инкубационного времени проведен анализ известных результатов лабораторных исследований динамической прочности горных пород как в случае сжатия, так и в случае растяжения. На основе данного подхода построена теоретическая кривая, описывающая увеличение предельного напряжения, при котором разрушается образец, для некоторых видов песчаника. Получена оценка величины инкубационного времени для каждого исследованного материала.

Ключевые слова: динамическая прочность, импульсная нагрузка, составной стержень Гопкинсона, инкубационное время, горная порода, песчаник, пористость, насыщенность.

DOI: 10.15372/PMTF20190317

Введение. Зависимость прочности материала от скорости деформации при воздействии динамических нагрузок имеет один и тот же вид как в случае сжатия, так и в случае растяжения. С увеличением скорости нагружения предельное значение напряжения, при котором упругая среда разрушается, растет. Можно предположить, что в данном случае существенное влияние на процессы образования трещин оказывает вязкость материала на микроуровне.

Существует большое количество работ, посвященных изучению механических свойств горных пород с учетом неоднородности их строения и влияния внешних воздействий [1]. Для объяснения изменения прочности материала при высокоскоростном нагружении предложен ряд полуэмпирических критериев, большинство которых представляют собой корреляционные зависимости между скоростью нагружения и динамической прочностью.

В работах [2–5] предложен критерий разрушения на основе инкубационного времени — параметра, характеризующего поведение прочности материала в условиях высокоскоростного нагружения. Этот подход использовался ранее для анализа экспериментальных данных о разрушении при динамическом нагружении таких горных пород, как известняк [6, 7], мрамор и гранит [7, 8] и др. С использованием критерия инкубационного времени удовлетворительно описываются экспериментальные данные для бетонов [9] и металлов [10].

Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.” (соглашение № 14.578.21.0246 (УИ RFMEFI57817X0246)).

© Мартемьянов А. Н., Петров Ю. В., 2019

В настоящей работе на основе результатов лабораторных испытаний с использованием критерия инкубационного времени строятся теоретические зависимости прочности различных видов песчаника от скорости деформации. Проводится оценка инкубационного времени, которое представляет собой характерное время (до момента макроразрушения), в течение которого в образцах породы происходит накопление дефектов структуры. Также исследуется влияние на процесс разрушения таких параметров, как насыщенность, температура и размер зерна.

1. Инкубационное время разрушения. Согласно критерию инкубационного времени разрушение материала в заданной точке происходит при выполнении условия

$$\frac{1}{d} \int_{x-d}^x \frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \left(\frac{\sigma(y, s)}{\sigma_{st}} \right)^\alpha ds dy \leq 1, \quad (1)$$

где $\sigma(x, t)$ — функция напряжения в точке x , зависящая от истории нагружения; d — характерный линейный размер области, в которой происходит накопление микродефектов; σ_{st} — статическая прочность материала; τ — инкубационное время; α — безразмерная характеристика, определяющая реакцию материала на величину нагрузки.

Макроскопическому разрушению материала в результате внешнего воздействия предшествуют процессы, происходящие на микроуровне. В случае горных пород такими процессами являются образование и рост микротрещин, их взаимодействие в процессе нагружения. Инкубационное время τ — макропараметр, определяющий характерное время развития указанных релаксационных процессов на данном масштабном уровне. Использование критерия инкубационного времени при анализе результатов динамических экспериментов является очень эффективным.

Обычно при определении прочности используются образцы цилиндрической формы. Диаметр сечения варьируется в интервале от десятков до сотен миллиметров. В экспериментах на сжатие используются цилиндрические образцы, длина которых равна диаметру или в два раза больше его, в экспериментах на растяжение непрямыми методами — образцы, длина которых в два раза меньше диаметра. В силу ограничений, налагаемых на размер исследуемых образцов, все полученные значения механических параметров следует относить к данному масштабному уровню, определяемому представительным объемом, который во многих случаях ассоциируется с масштабом и геометрией испытываемого образца. Поэтому можно исключить интегрирование по пространственной переменной из соотношения (1), в результате чего оно принимает вид

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \frac{\sigma(x, s)}{\sigma_{st}} ds \leq 1. \quad (2)$$

Следует отметить, что результаты лабораторных исследований часто содержат информацию, которой недостаточно для восстановления всех необходимых параметров. В данной работе при определении инкубационного времени τ параметр α полагается равным единице.

Во многих случаях функцию напряжений, действующих в ходе эксперимента на образец, можно аппроксимировать линейной зависимостью

$$\sigma(t) = E\dot{\epsilon}tH(t) = \dot{\sigma}tH(t), \quad (3)$$

где $\dot{\sigma}$ — скорость нагружения; $\dot{\epsilon}$ — скорость деформации; E — статический модуль Юнга; $H(t)$ — функция Хевисайда. Подставляя выражение (3) в соотношение (2), можно провести интегрирование и получить теоретическое значение времени разрушения t_* :

$$t_*(\dot{\sigma}) = \begin{cases} \sqrt{2\sigma_{st}\tau/\dot{\sigma}}, & \dot{\sigma} > 2\sigma_{st}/\tau, \\ \sigma_{st}/\dot{\sigma} + \tau/2, & \dot{\sigma} \leq 2\sigma_{st}/\tau. \end{cases} \quad (4)$$

Равенство (4) представляет собой однозначную непрерывную зависимость времени разрушения от скорости нагружения. Подставляя зависимость (4) в (3), получаем выражение для динамической прочности

$$\sigma_{dyn}(\dot{\sigma}) = \begin{cases} \sqrt{2\sigma_{st}\tau\dot{\sigma}}, & t < \tau, \\ \sigma_{st} + \tau\dot{\sigma}/2, & t \geq \tau. \end{cases} \quad (5)$$

Заметим, что в равенстве (5) первое выражение соответствует случаю динамического нагружения, когда разрушение происходит за время, меньшее по сравнению с временем, необходимым для протекания релаксационных процессов, второе выражение описывает случай “медленного” нагружения, когда время до момента разрушения образца сопоставимо с инкубационным временем τ либо больше его. Таким образом, динамическую прочность материала можно определить, если известны три макроскопических параметра: статический модуль Юнга E , статическая прочность σ_{st} и инкубационное время τ .

Далее проводится сравнение зависимости (5) с аналогичными экспериментальными зависимостями. При определении характерного значения τ аппроксимация строится с использованием метода наименьших квадратов.

Оценка погрешности вычисления инкубационного времени проводится графическим или дифференциальным методом. Для представленного набора экспериментальных данных среднеквадратичное отклонение измеренных значений динамической прочности от теоретических значений рассчитывается по формуле

$$\Delta\sigma_i = \left[\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\sigma_i - \sigma_{dyn}(\dot{\sigma}_i))^2 \right]^{1/2}.$$

2. Эксперименты по измерению динамической прочности. В настоящее время существует большое количество способов измерения прочностных характеристик материалов при различных конфигурациях внешних напряжений и дополнительном влиянии физических полей. Значение прочности на сжатие в большинстве случаев определяется в процессе одностадийного одноосного сжатия при отсутствии боковой нагрузки. Прочность на растяжение может быть получена несколькими способами, включающими прямое растяжение, бразильский метод, трехточечный тест и откол. Обычно скорость деформации в данных экспериментах не превышает $10^{-6} \div 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, что соответствует квазистатическому нагружению.

Использование предложенного в середине XX в. метода Кольского позволило проводить указанные выше измерения в случае динамического воздействия при скорости деформации в интервале $10^2 \div 10^4 \text{ с}^{-1}$. Позднее этот подход был модифицирован и в настоящее время известен как метод составного стержня Гопкинсона.

В эксперименте по исследованию динамического разрушения (рис. 1) используются два металлических стержня длиной $8 \div 15 \text{ м}$ с известными характеристиками упругости. Исследуемый образец помещается между этими стержнями. Металлический ударник, свойства которого также известны, разгоняется под действием струи газа и врежется в первый стержень, сообщая тому импульс сжатия определенной амплитуды и продолжительности. Иницированное возмущение распространяется вдоль стержня, достигая образца, где частично отражается, а частично проходит через исследуемый материал во второй стержень (рис. 2). Распространяющиеся в обоих стержнях импульсы фиксируются с помощью пьезоэлектрических датчиков, расположенных в середине каждого стержня, что позволяет восстановить напряжения, действующие на обоих торцах образца, с помощью компьютерной обработки.

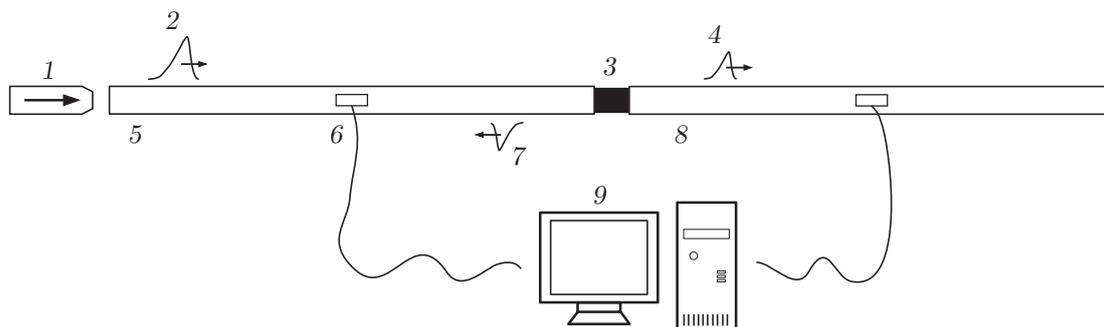


Рис. 1. Схема эксперимента с использованием стержня Гопкинсона: 1 — металлический ударник, 2 — импульс сжатия, 3 — образец, 4 — импульс, прошедший через образец, 5 — первый стержень, 6 — пьезоэлектрический датчик, 7 — импульс, отраженный от образца, 8 — второй стержень, 9 — компьютер

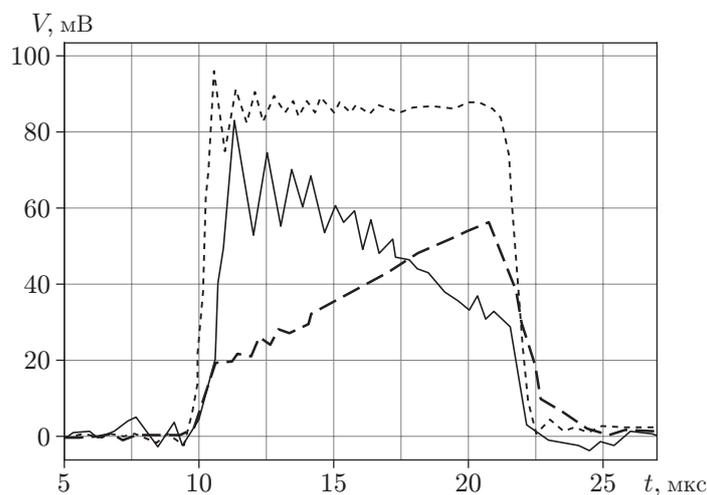


Рис. 2. Исходный (пунктирная линия), отраженный (сплошная линия) и прошедший (штриховая линия) импульсы напряжения V , регистрируемые в эксперименте с использованием стержня Гопкинсона

Параметры установки подбираются таким образом, чтобы достигалось равенство напряжений, действующих на образец со стороны стержней (рис. 3). Это позволяет избежать неоднородного распределения возмущений и использовать квазистатические формулы для расчета соответствующих значений.

В качестве величины динамической прочности принимается наибольшее значение напряжений, достигаемых в эксперименте. Время разрушения соответствует максимальному значению напряжения. Скорость нагружения равна тангенсу угла наклона касательной к кривой зависимости напряжений от времени.

Как отмечено выше, метод составного стержня Гопкинсона может быть использован во всех экспериментах по измерению прочностных характеристик, но для проведения трехточечного теста необходимо три стержня вместо двух.

Для исследования влияния трехосного напряженного состояния, температуры, насыщенности и порового давления на динамическую прочность материалов лабораторные установки могут быть соответствующим образом модифицированы [1].

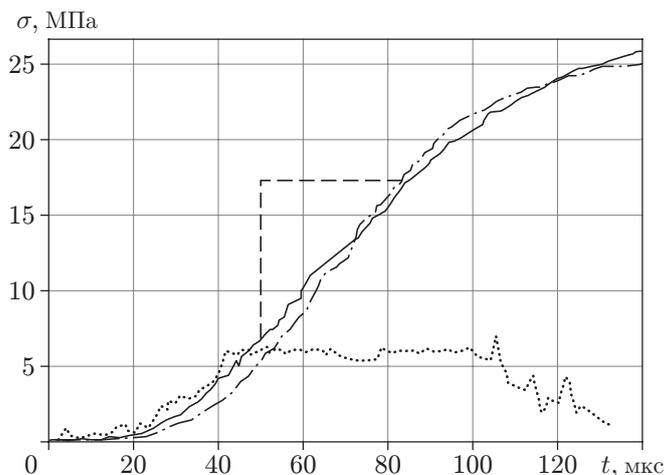


Рис. 3. Зависимости напряжений на торцах образца от времени, полученные в эксперименте с использованием стержня Гопкинсона: сплошная линия — напряжения, определенные по исходному и отраженному импульсам, штрихпунктирная — напряжения, определенные по прошедшему импульсу, штриховая — импульс напряжения, пунктирная — скорость деформации

3. Инкубационное время для песчаников. Критерий инкубационного времени применяется в данной работе для анализа результатов экспериментов по разрушению образцов песчаников различного типа в условиях высокоскоростного нагружения. Для каждого случая в отдельности строится зависимость (5) на основе известных статических параметров породы, наилучшим образом аппроксимирующая совокупность данных, полученных при динамическом нагружении. Соответствующее значение инкубационного времени τ характеризует способность материала разрушаться при высокоскоростном воздействии.

Наличие жидкости в пористой среде оказывает существенное влияние на механические свойства испытываемого материала. Существует большое количество работ, в которых проводится сравнение упругих и прочностных свойств насыщенных и ненасыщенных горных пород. Представляет интерес проведение такого сравнения для случая динамического нагружения.

3.1. Насыщенность породы. В работе [11] описываются результаты экспериментальных исследований влияния насыщенности на прочностные характеристики песчаников двух типов: красного и бурого.

Красный песчаник характеризуется повышенными упругими и прочностными свойствами, что обусловлено мелкозернистой структурой материала, и имеет достаточно малую пористость (5,5 %).

Бурый песчаник, наоборот, состоит из крупных частиц и является менее прочным при внешнем воздействии, его пористость равна 22,7 %.

В экспериментах использовались образцы цилиндрической формы, диаметр которых равен 31,75 мм, длина — 12,7 мм. Значения статических характеристик обоих материалов приведены в табл. 1 (E — модуль Юнга, σ_c , σ_p — прочность материала на сжатие и растяжение).

С использованием построенных по данным лабораторных измерений теоретических кривых (рис. 4, а) для красного и бурого песчаников можно получить значение прочности этих пород при действии динамических напряжений сжатия с погрешностью, не превышающей 8 %. Вычисленное в данной работе значение инкубационного времени для нена-

Таблица 1

Статические механические характеристики красного и бурого песчаников

| Тип песчаника | E, ГПа | | σ_c , МПа | | σ_p , МПа | |
|------------------|----------------|----------------|------------------|-----------------|------------------|----------------|
| | ННП* | НП** | ННП | НП | ННП | НП |
| Красный | $25,6 \pm 0,2$ | $23,4 \pm 0,4$ | $195,2 \pm 3,4$ | $153,6 \pm 1,2$ | $26,6 \pm 0,6$ | $16,2 \pm 0,5$ |
| Бурый | $12,4 \pm 0,2$ | $11,2 \pm 0,2$ | $74,5 \pm 1,2$ | $62,3 \pm 0,8$ | $8,0 \pm 0,2$ | $5,3 \pm 0,2$ |

* ННП — ненасыщенная порода.

** НП — насыщенная порода.

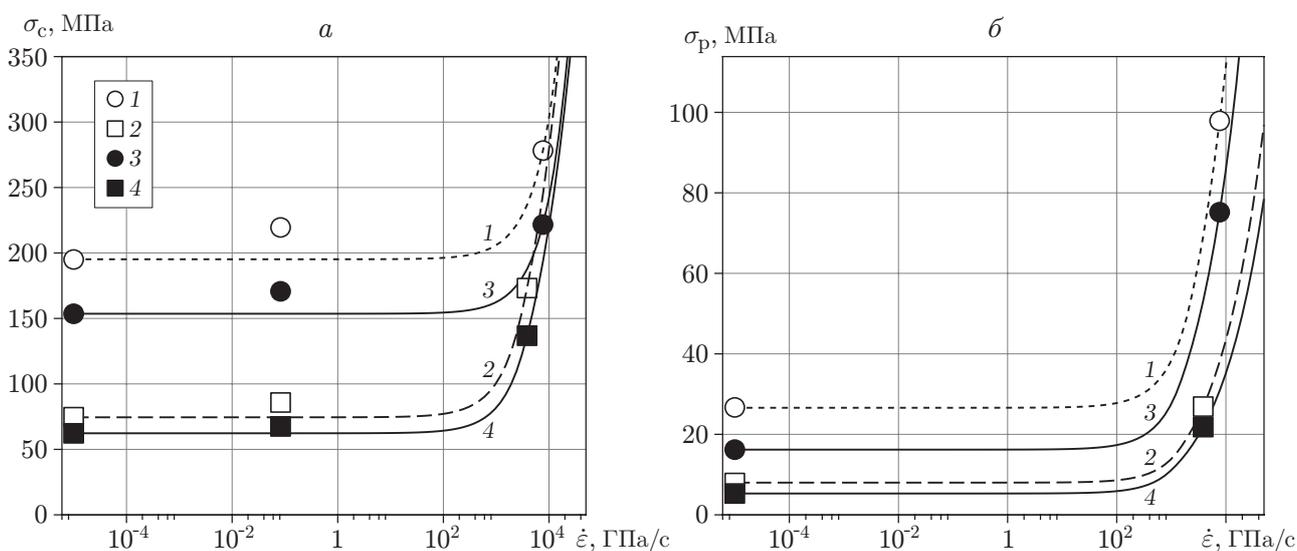


Рис. 4. Зависимость прочности красного и бурого песчаника от скорости нагружения в случаях сжатия (а) и растяжения (б):

точки — экспериментальные данные, линии — теоретические зависимости, полученные с использованием критерия инкубационного времени; 1, 2 — ненасыщенная порода (1 — красный песчаник, 2 — бурый песчаник), 3, 4 — насыщенная порода (3 — красный песчаник, 4 — бурый песчаник)

сыщенного красного песчаника составляет 22 мкс, для насыщенного — порядка 18 мкс. Результаты аналогичного расчета для бурого песчаника показывают, что для ненасыщенного материала $\tau = 52$ мкс, для насыщенного $\tau = 39$ мкс. С учетом погрешности, возникающей при определении статических и динамических значений, погрешность, составляющая 18 %, является допустимой.

Таким образом, при сжимающих нагрузках инкубационное время для насыщенной водой породы приблизительно на 20 % меньше, чем для ненасыщенной породы.

Измерения динамической прочности на растяжение проводились с использованием бразильского метода. С помощью критерия инкубационного времени можно рассчитать теоретическую зависимость прочности от скорости нагружения (рис. 4,б) и вычислить параметр τ . В отличие от случая сжатия значения инкубационного времени для насыщенной и ненасыщенной пород совпадают. Для красного песчаника $\tau = 23$ мкс, для бурого — $\tau = 12$ мкс. В данном случае погрешность составляет 16 %.

В работах [6, 7], в которых исследовались песчаные и карбонатные материалы, показано, что увеличение насыщенности породы может приводить к существенному увеличению значений инкубационного времени.

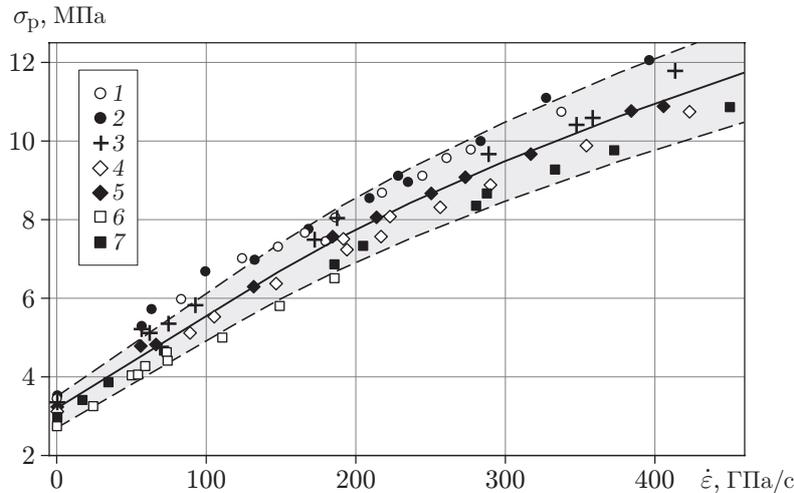


Рис. 5. Зависимость прочности песчаника из пещер Лунью от скорости деформации в случае динамического растяжения при различных значениях температуры:

сплошная линия — теоретическая зависимость, полученная при $\sigma_{st} = 3,5$ МПа, $\tau = 49$ мкс; заштрихованная область — область значений прочности песчаника; 1 — $T = 150$ °С, 2 — $T = 25$ °С, 3 — $T = 450$ °С, 4 — $T = 350$ °С, 5 — $T = 250$ °С, 6 — $T = 850$ °С, 7 — $T = 600$ °С

3.2. *Температура.* Проведена серия лабораторных тестов по разрушению образцов песчаника при динамическом нагружении при различных значениях температуры [12]. Исследовался песчаник из пещер Лунью (Китай). Данная порода характеризуется мелкозернистой структурой, состоит преимущественно из зерен кварца и полевого шпата и имеет пористость, равную 17 %.

В эксперименте использовались цилиндрические образцы диаметром 40 мм и длиной 20 мм. Измерение динамической прочности на разрыв проводилось с помощью бразильского метода и модифицированного метода стержня Гопкинсона. Образцы были разделены на семь групп. Перед испытанием образцы каждой группы помещались в электрическую печь, где нагревались до температуры $T = 25, 150, 250, 350, 450, 600, 850$ °С соответственно.

Экспериментальные данные анализировались с использованием соотношения (5). Построенные кривые аппроксимируют соответствующие экспериментальные данные с погрешностью, равной 3 %. Полученные значения инкубационного времени находятся в интервале $\tau = 44 \div 52$ мкс, погрешность расчета составляет 12 мкс. На рис. 5 показан диапазон значений динамической прочности образцов песчаника в исследуемом интервале температур, теоретическая кривая построена при $\sigma_{st} = 3,5$ МПа, $\tau = 49$ мкс.

3.3. *Прочность на сжатие.* Ниже приведены результаты экспериментов, в которых с помощью критерия инкубационного времени изучалась динамическая прочность на сжатие песчаников двух типов.

В работе [13] исследовался песчаник из Хоксбери (Австралия). Эта горная порода характеризуется следующими механическими параметрами: плотность — $2,21$ г/см³, модуль Юнга — $8,39$ ГПа, коэффициент Пуассона — $0,21$, статическая прочность на сжатие — 41 МПа. Образцы имели форму цилиндров с диаметром и длиной образующей, равными 48 мм. Инкубационное время для данной горной породы составляет 43 мкс (с погрешностью, приближенно равной 8 мкс).

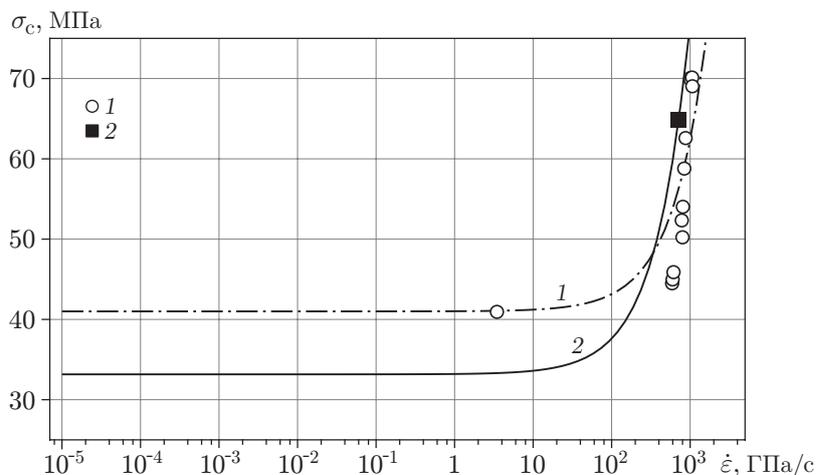


Рис. 6. Зависимость прочности песчаника из Хоксбери (1) и зеленого песчаника (2) от скорости деформации при сжатии:
 точки — экспериментальные данные, линии — теоретические зависимости, полученные с использованием критерия инкубационного времени

Аналогичные эксперименты проводились с зеленым песчаником из округа Нейцзян (Китай) [14]. Механические характеристики этого материала близки к механическим характеристикам песчаника из Хоксбери: плотность — $2,17 \text{ г/см}^3$, модуль Юнга — $8,4 \text{ ГПа}$, коэффициент Пуассона — $0,29$, статическая прочность на сжатие — $33,16 \text{ МПа}$, на растяжение — $2,27 \text{ МПа}$. Пористость породы составляет $4,5 \%$. Исследовались цилиндрические образцы с диаметром и длиной, равными 50 мм .

Значение инкубационного времени для зеленого песчаника составило 89 мкс . Оценить точность этого значения в данном случае не представляется возможным вследствие недостаточного количества экспериментальных данных.

Теоретические кривые и экспериментальные данные представлены на рис. 6. Из приведенных экспериментальных данных следует, что порода, менее прочная при статическом нагружении, оказалась более прочной при динамическом нагружении, и наоборот. Таким образом, при динамическом нагружении прочность породы зависит от процессов, происходящих на микроуровне, и от инкубационного времени.

Параметры всех типов песчаников при действии динамических напряжений сжатия приведены в табл. 2. Следует отметить, что инкубационное время, как и другие механические характеристики, варьируется в достаточно широком диапазоне и, по-видимому, существенно зависит от состава и структуры материала на микроуровне.

3.4. Прочность на растяжение. Строение горной породы оказывает существенное влияние на ее механические характеристики. Так, поведение материалов, относящихся к одному литотипу, при нагружении может различаться вследствие различий объема порового пространства, его строения, минералогического состава и размера зерна.

Проведены эксперименты с песчаником из шахты Сяо Джихан (Китай) [15]. Образцы отбирались из слоев горной породы с существенно различающейся структурой. В результате были сформированы три группы: мелко-, средне- и крупнозернистые образцы. Физические характеристики испытываемых пород приведены в табл. 3 (D — средний размер зерна). Для измерения прочности на разрыв бразильским методом используются цилиндры с соотношением диаметра и длины образующей $2 : 1$. Поэтому в экспериментах использовались образцы с размерами $50 \times 25 \text{ мм}$.

Таблица 2

Параметры прочности песчаников под действием сжимающей нагрузки согласно критерию инкубационного времени

| Тип песчаника | σ_c , МПа | τ , мкс |
|---------------|------------------|--------------|
| Красный | 195,20 | 22 |
| Бурый | 74,50 | 52 |
| Хоксбери | 41,00 | 43 |
| Зеленый | 33,16 | 89 |

Таблица 3

Механические характеристики песчаников из шахты Сяо Джихан

| Тип песчаника | D , мм | E , ГПа | σ_c , МПа | σ_p , МПа |
|-----------------|----------|-----------|------------------|------------------|
| Крупнозернистый | 0,231 | 13,63 | 48,60 | 3,99 |
| Среднезернистый | 0,105 | 35,80 | 62,57 | 5,80 |
| Мелкозернистый | 0,030 | 53,00 | 123,56 | 12,62 |

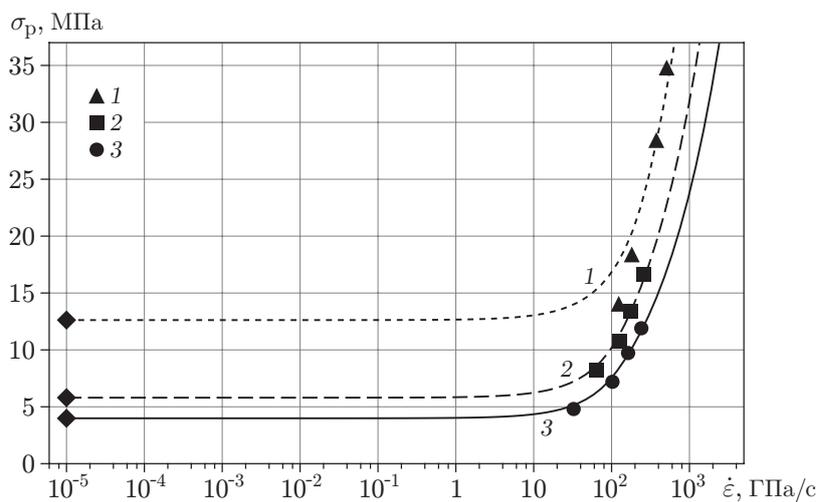


Рис. 7. Зависимость прочности песчаника из шахты Сяо Джихан от скорости деформации при растяжении:

точки — экспериментальные данные, линии — теоретические зависимости, полученные с использованием критерия инкубационного времени; 1 — мелкозернистые образцы, 2 — среднезернистые образцы, 3 — крупнозернистые образцы

Теоретические кривые прочности (рис. 7), построенные с использованием равенства (5), позволяют получить значение предельной нагрузки с погрешностью, не превышающей 3 %. Значения инкубационного времени, соответствующие крупно-, средне- и мелкозернистому типам песчаника, равны 71, 87 и 84 мкс (погрешность не превышает 18 мкс).

Заключение. В работе показано, что изменение прочности горных пород при динамическом нагружении существенно зависит от процессов, происходящих на микроуровне: растрескивания зерен, ветвления и взаимодействия микротрещин и т. д. Макроскопическому разрыву материала предшествуют релаксационные процессы, происходящие на микроуровне. От характера релаксационных процессов зависит время до разрушения материала на макроуровне. С помощью критерия инкубационного времени, использованного в данной работе для определения структурно-временных параметров разрушения песчаников различного типа, можно построить зависимости прочности пород от скорости деформации. Анализ результатов проведенного исследования позволяет сделать следующие выводы. Инкубационное время изученных песчаных пород варьируется в диапазоне от 10 до 90 мкс и различно при действии напряжений сжатия и растяжения. Насыщенность образцов флюидом может оказывать существенное влияние на прочность породы. Некоторые горные породы, менее прочные при статическом нагружении, являются более прочными при динамическом нагружении, и наоборот.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Zhang Q. B., Zhao J.** A review of dynamic experimental techniques and mechanical behaviour of rock materials // *Rock Mech. Rock Engng.* 2014. V. 47. P. 1411–1478.
2. **Petrov Yu. V., Utkin A. A.** Dependence of the dynamic strength on loading rate // *J. Materials Sci.* 1989. V. 25, N 2. P. 153–156.
3. **Petrov Yu. V.** Quantum analogy in the mechanics of fracture of solids // *Phys. Solid State.* 1996. V. 38, N 11. P. 1846–1850.
4. **Петров Ю. В.** Критерий инкубационного времени и импульсная прочность сплошных сред: разрушение, кавитация, электрический пробой // *Докл. АН.* 2004. Т. 5, № 5. С. 621–625.
5. **Petrov Yu. V., Morozov N. F.** On the modeling of fracture of brittle solids // *J. Appl. Mech.* 1994. V. 61. P. 710–712.
6. **Smirnov I., Konstantinov Al., Bragov A., et al.** The structural temporal approach to dynamic and quasi-static strength of rocks and concrete // *Proc. of the 27th Intern. conf. “Mathematical and computer simulations in mechanics of solids and structures. Fundamentals of static and dynamic fracture”*, St Petersburg, Sept. 25–27, 2017. *Procedia Structural Integrity.* 2017. V. 6. P. 34–39.
7. **Martemyanov A. N., Petrov Y. V.** Understanding of rock material behavior under dynamic loadings based on incubation time criteria approach // *Proc. of the 3rd Intern. sci. school for young sci. “Physical and mathematical modeling of Earth and environments processes” PMMEEP 2017*, Moscow, Nov. 2017. Cham: Springer Geology. Springer, 2018. P. 233–248.
8. **Martemyanov A., Selyutina N. S., Katorina A.** Incubation time criterion analysis of rock materials under dynamic loadings // *Proc. of the 27th Intern. conf. “Mathematical and computer simulations in mechanics of solids and structures. Fundamentals of static and dynamic fracture”*, St Petersburg, Sept. 25–27, 2017. *Procedia Structural Integrity.* 2017. V. 6. P. 336–343.
9. **Брагов А. М., Карихалу Б. Л., Петров Ю. В. и др.** Высокоскоростное деформирование и разрушение фибробетона // *ПМТФ.* 2012. Т. 53, № 6. С. 144–152.
10. **Смирнов В. И., Петров Ю. В.** Влияние формы импульса на откольную прочность // *ПМТФ.* 2018. Т. 59, № 2. С. 134–141.

11. **Kim E., Changani H.** Effect of water saturation and loading rate on the mechanical properties of Red and Buff Sandstones // Intern. J. Rock Mech. Mining Sci. 2016. V. 88. P. 23–28.
12. **Yao W., Xu Y., Wang W., Kanopolous P.** Dependence of dynamic tensile strength of longyou sandstone on heat-treatment temperature and loading rate // Rock Mech. Rock Engng. 2016. V. 49. P. 3899–3915.
13. **Xing H. Z., Zhang Q. B., Ruan D., et al.** Full-field measurement and fracture characterisations of rocks under dynamic loads using high-speed three-dimensional digital image correlation // Intern. J. Impact Engng. 2018. V. 113. P. 61–72.
14. **Li S. H., Zhu W. C., Niu L. L., et al.** Dynamic characteristics of green sandstone subjected to repetitive impact loading: phenomena and mechanisms // Rock Mech. Rock Engng. 2018. V. 51. P. 1921–1936.
15. **Yu M., Wei C., Niu L.** The coupled effect of loading rate and grain size on tensile strength of sandstones under dynamic disturbance // Shock Vibrat. 2017. V. 2017. 6989043.

*Поступила в редакцию 27/IX 2018 г.,
после доработки — 27/IX 2018 г.
Принята к публикации 26/XI 2018 г.*
