

НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

УДК 622.02

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭВОЛЮЦИИ СЛОЖНОГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГЕОМАТЕРИАЛОВ ПРИ СЛАБЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

В. П. Косых, П. В. Косых, А. Ф. Ревуженко

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: v-kosykh@yandex.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Разработан стенд для испытаний образцов геоматериалов при нагружении кручением и продольным сжатием с одновременным воздействием многократными слабыми ударами. Скомплектована измерительная система и подобраны датчики для статических и динамических измерений деформаций. Проведены тестовые эксперименты на циклическое кручение образца из смеси гипса и кварцевого песка. Измерены статические и динамические деформации, определена скорость прохождения упругой волны в оргстекле.

Кручение, сжатие, механические свойства геоматериалов, испытание образцов, динамические нагрузки, напряженно-деформированное состояние

DOI: 10.15372/FTPRPI20170621

В естественных условиях массивы горных пород находятся под воздействием постоянных или медленно изменяющихся статических нагрузок, на фоне которых действуют многократно повторяющиеся переменные нагрузки слабой интенсивности (приливные, нагрузки от изменения атмосферных условий, транспортные вибрации и др.). В качестве примера можно привести горные выработки, плотины и напорные тоннели гидроэлектростанций, основания фундаментов турбоагрегатов и тяжелого промышленного оборудования, подземные хранилища нефти и газа [1, 2].

Лабораторными и натурными исследованиями установлено, что под влиянием периодических нагрузок геоматериалы способны менять свои механические свойства [3–7]. Как правило, такие исследования проводятся при уровне изменения напряжений, сравнимых с пределом прочности образцов геоматериалов [3]. Работ по изучению влияния слабых периодических воздействий, продолжающихся достаточно долго, на изменение механических свойств геоматериалов известно немного.

Работа выполнена за счет средств Российского научного фонда (проект № 16-17-10121).

Горные породы представляют собой среду с внутренней структурой на различных масштабных уровнях. При деформировании они способны накапливать энергию, запасенную на внутренних самоуравновешенных напряжениях. Образец, “заряженный” такими напряжениями, при определенных условиях может высвобождать накопленную энергию [8, 9]. Роль триггера в этом процессе играют слабые динамические воздействия.

В настоящей работе приведено описание стенда сложного нагружения, позволяющего исследовать влияние многократных слабых ударов, действующих на фоне заданной статической нагрузки, на эволюцию прочностных и деформационных свойств образцов геоматериалов. Нагружение образца осуществлялось совместным действием кручения и продольного сжатия, а удары наносились по торцу образца.

Конструкция стенда показана на рис. 1. Станина стенда представлена тремя массивными вертикальными плитами, закрепленными на основании. Для придания необходимой жесткости плиты дополнительно соединены продольными стяжками. В плитах имеются соосные отверстия, в которые вмонтированы втулка с упорной резьбой 5, корпус подшипника скольжения 7, упорный зажим 11. Во втулку 5 вкручен нагружающий винт 4, который через стальной полированный закаленный шар 3 и датчик продольной силы 2 передает нагрузку на подвижный зажим 6. Зажим может легко вращаться и перемещаться вдоль оси во фторопластовой втулке 1, благодаря чему усилие от винта полностью передается на закрепленный в нем образец испытуемого геоматериала 12. На левой стороне зажима 6 расположен шестигранный участок для крепления устройства, обеспечивающего крутящий момент (на рисунке не показан). Правой стороной образец закреплен в упорном зажиме 11, который может совершать малые продольные перемещения вдоль оси. От вращения зажим удерживается упругой мембраной 8, закрепленной на нем с помощью прижимного кольца 10, а на станине — кольцом 9. Упорный зажим 11 имеет цилиндрический хвостовик, проходящий через фторопластовый подшипник скольжения. Хвостовик имеет сферическим торцом, по которому возможно нанесение ударов, передающихся на нагруженный статической нагрузкой образец геоматериала 12.

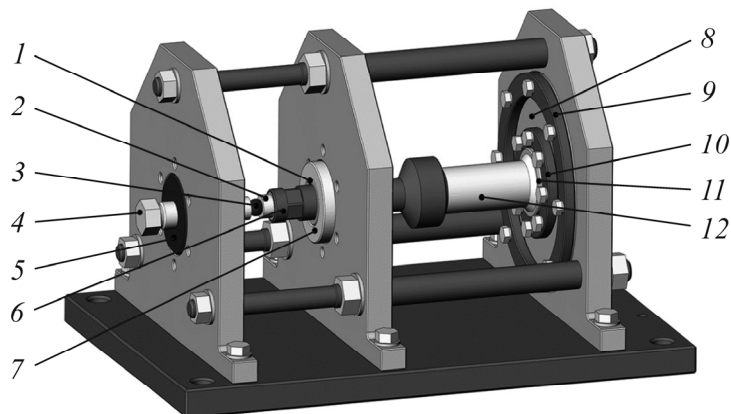


Рис. 1. Стенд для испытаний: 1 — фторопластовая втулка; 2 — датчик продольной силы; 3 — шар для передачи продольной нагрузки; 4 — нагружающий винт; 5 — втулка с упорной резьбой; 6 — подвижный зажим; 7 — корпус подшипника скольжения; 8 — мембрана; 9, 10 — прижимные кольца; 11 — упорный зажим; 12 — образец геоматериала

Образец испытуемого материала имеет форму полого цилиндра, на концах которого предусмотрены утолщения для закрепления в зажимах. Фиксация образца проводится путем заливки эпоксидным клеем. Длина рабочей части образца составляет 80 мм, внешний диаметр — 40, внутренний — 20 мм, диаметр утолщений — 60 мм, полная длина образца — 120 мм.

Стенд позволяет проводить статические испытания геоматериалов при совместном независимом действии крутящего момента и сжимающей нагрузки по разным программам нагружения, а также исследования эволюции механических свойств при дополнительном действии многократных слабых ударов в течение длительного времени. Измеряемыми параметрами в экспериментах являются продольная сила, крутящий момент, угол закручивания образца, продольная и поперечная деформации, а также динамические деформации и скорость прохождения упругих волн через образец.

Измерительная система стенда состоит из 8-канальной крейтовой системы LTR-EU-8-2 фирмы L-Card (г. Москва), в состав которой входят 8 измерительных модулей. Система позволяет вести непрерывный сбор информации с 16 тензометрических датчиков, 8 акселерометров, а также записывать высокочастотные (до 10 МГц) сигналы одновременно по четырем каналам.

Для проведения статических измерений стенд оборудован тензометрическими датчиками крутящего момента и продольной силы, а также датчиками силы FC50-50KN. Измерение деформаций образца при статических испытаниях выполняется съемными мездозами оригинальной конструкции. При динамических испытаниях деформации измеряются фольговыми тензорезисторами, наклеенными непосредственно на образец. Исследование волновых процессов в образце осуществляется с помощью акселерометров AP2019 и полупроводниковых тензорезисторов HV101B-350 с базой 5 мм. Использование двух таких датчиков, наклеенных на образец на определенном расстоянии друг от друга, позволяет по задержке времени прохождения волны деформации вычислять скорость распространения упругой волны. Датчики имеют коэффициент тензочувствительности 150 и допускают ток питания до 15 мА. Такие параметры позволяют включать их в простой делитель напряжения и записывать вырабатываемый высокочастотный сигнал с помощью осциллографического модуля крейтовой системы.

На рис. 2 приведена диаграмма “касательные напряжения–угол сдвига” для первых пяти циклов кручения образца, приготовленного из смеси гипса и кварцевого песка в соотношении 1 : 1. Видно, что с увеличением числа циклов происходит накопление остаточных сдвиговых деформаций образца.

На рис. 3 представлена диаграмма деформирования органического стекла, полученная при одноосном сжатии. Образец не доводился до разрушения с целью сохранения его для других тестов. По результатам этих испытаний модуль упругости материала составил $3.35 \cdot 10^9$ Па, а коэффициент Пуассона 0.42.

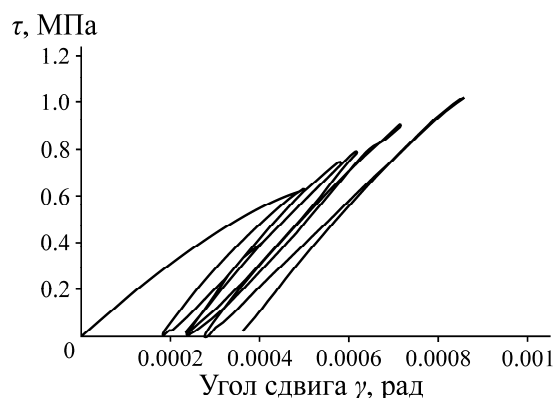


Рис. 2. Диаграмма циклического кручения образца

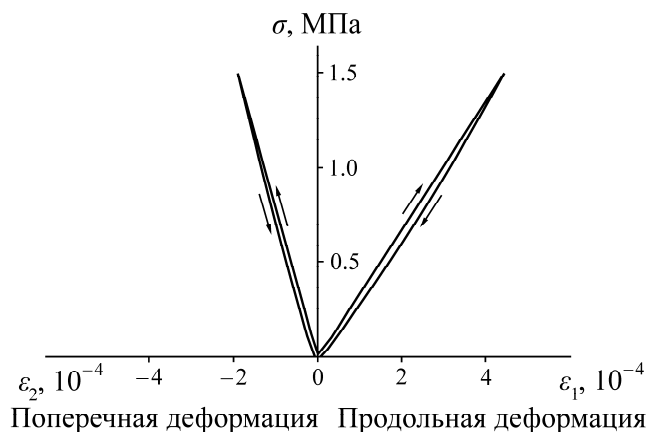


Рис. 3. Диаграмма деформирования образца при осевом сжатии

Обратимся к анализу системы “стенд–образец” при ударных воздействиях. При ударе в системе возникает колебательный процесс, в который включены подвижные части стенда, а испытуемый образец материала оказывается нагруженным переменными нагрузками различных частот.

В качестве первого приближения проанализируем эти колебания с помощью дискретной динамической модели системы “стенд–образец” (рис. 4а). Модель включает в себя две сосредоточенные массы m_1 и m_2 , которые соединены между собой упругими элементами с жесткостями c_1 , c_2 и c_0 . В сосредоточенные массы входят массы узлов стенда, которые являются подвижными и принимают участие в колебательном процессе. Образец и податливые части конструкции — мембрана и резиновые прокладки — обуславливают существование упругих элементов в модели. Разрез стенда, на котором показаны его подвижные части и образец геоматериала, приведен на рис. 4б.

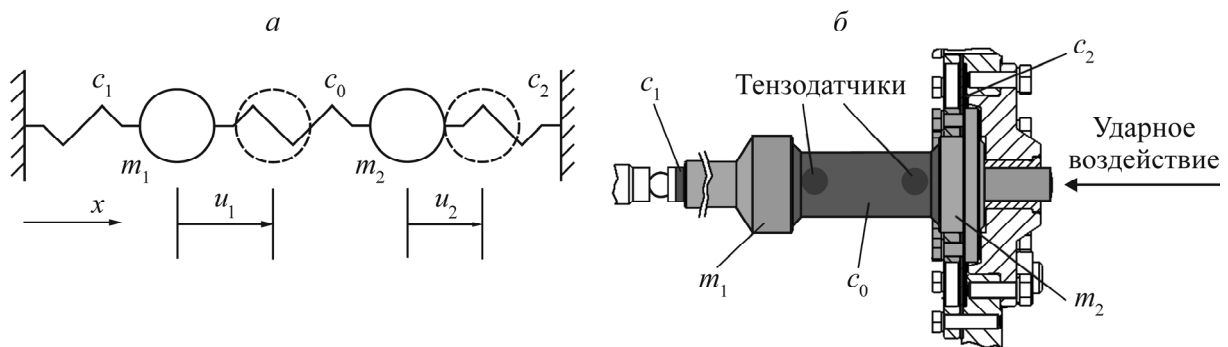


Рис. 4. Дискретная динамическая модель системы “стенд–образец” (а) и разрез стенда с выделенными подвижными элементами и образцом (б)

Жесткость центрального упругого элемента c_0 модели является жесткостью образца. Масса m_1 соответствует левому зажиму, а m_2 — правому. Резиновая прокладка с левой стороны зажима и датчик осевого усилия представлены жесткостью c_1 . Жесткость c_2 соответствует мембране и упорной прокладке правого зажима.

Уравнения для описания динамики системы имеют вид $m_1 \ddot{u}_1 = -c_1 u_1 - c_0(u_1 - u_2)$; $m_2 \ddot{u}_2 = -c_2 u_2 - c_0(u_2 - u_1)$, где u_i — смещение массы i . Принимая, что свободные колебания системы совершаются по гармоническому закону, отыщем их частоты и формы. Перемещения масс запишутся как $u_i = A_i \sin \omega t$ (A_i — форма колебания для массы i , ω — частота колебания). Тогда частоты собственных колебаний определяются из уравнения $m_1 m_2 \omega^4 + [-m_1(c_0 + c_2) - m_2(c_0 + c_1)]\omega^2 + c_1 c_2 + c_1 c_0 + c_0 c_2 = 0$. Подставив известные значения жесткостей и масс, получаем значения частот и соответствующие им формы (рис. 5).

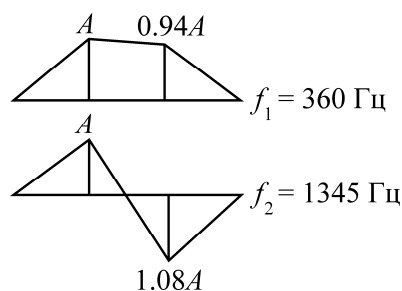


Рис. 5. Частоты и формы собственных колебаний системы “стенд–образец” ($f_i = \omega_i / 2\pi$)

На рис. 6 представлены осциллограммы продольных динамических деформаций образца из органического стекла, полученные с помощью двух полупроводниковых тензодатчиков, наклеенных вдоль его образующей на расстоянии 40 мм друг от друга, а также график колебаний, построенный по результатам расчета собственных частот с помощью дискретной модели. Из рис. 6 следует, что процесс является суперпозицией колебаний нескольких частот и имеет затухающий характер. Сравнение вычисленных собственных частот с экспериментальными показывает, что их расхождение не превышает 30 %.

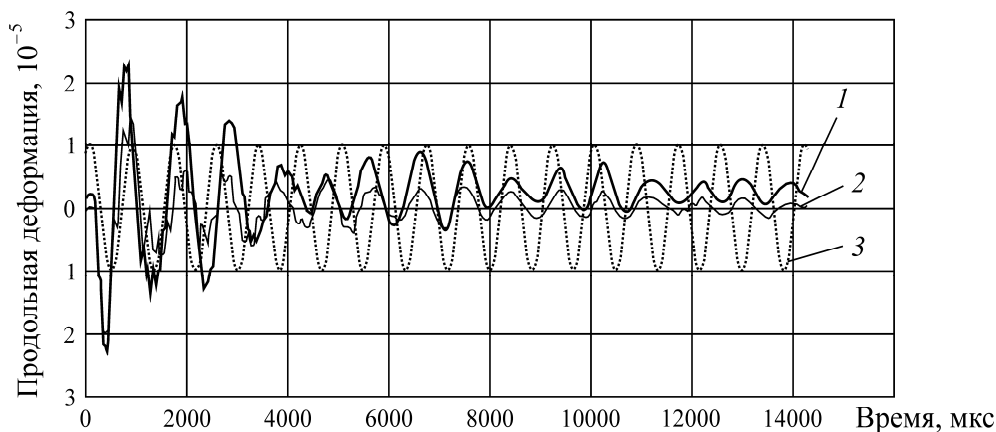


Рис. 6. Осциллограммы продольных деформаций, возникающих в образце при ударе: 1 — деформация правой части образца (ближе к месту нанесения удара); 2 — деформация левой части; 3 — кривая колебаний, построенная по аналитическому решению

Рассмотрим возможность измерения скорости прохождения упругих волн через образец. На рис. 7 приведены начальные участки нормализованных осциллограмм продольных деформаций, возникающих в образце после удара.

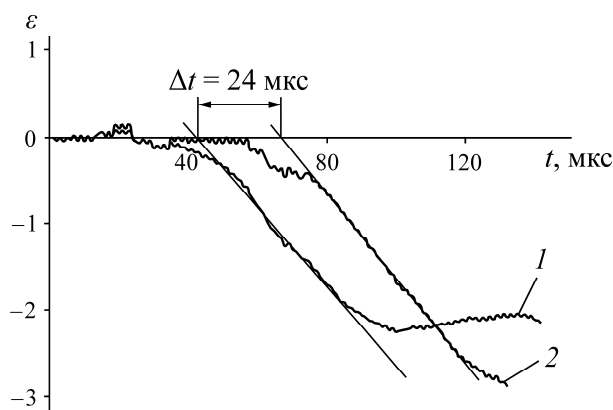


Рис. 7. Определение времени задержки при прохождении упругой волны через образец: 1 — деформация правой части образца (ближе к месту нанесения удара); 2 — деформация левой части

Видно, что сигнал на втором датчике возникает с задержкой $\Delta t = 24$ мкс по сравнению с первым. Эта задержка связана со скоростью распространения упругой волны в образце. Учитывая, что расстояние между первым и вторым датчиком $l = 40$ мм, получаем, что скорость распространения упругой волны $v = l / \Delta t = 1668$ м/с. Значение скорости для органического стекла вычислено по известной формуле: $v = \sqrt{E / \rho} = \sqrt{3.35 \cdot 10^9 / 1190} = 1677$ м/с. Расхождение невелико.

ВЫВОДЫ

Разработан стенд для испытаний цилиндрических образцов твердых геоматериалов при их независимом нагружении продольной сжимающей силой и крутящим моментом. Стенд позволяет воздействовать на статически нагруженный образец дополнительными ударными нагрузками.

Скомплектована измерительная система и подобраны первичные датчики для статических и динамических измерений деформаций образцов при сложном нагружении и дополнительном воздействии слабыми ударами.

Тестовый эксперимент на циклическое кручение образца, приготовленного из смеси гипса и кварцевого песка, показал, что с увеличением числа циклов нагружения в образце происходит накопление остаточных сдвиговых деформаций.

Проведены тестовые эксперименты по одноосному сжатию образца из органического стекла и измерению в нем статических и динамических деформаций, а также скорости прохождения упругой волны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вознесенский Е. А.** Динамическая неустойчивость грунтов. — М.: Эдиториал УРСС, 1999. — 264 с.
2. **Шейнин В. И., Блохин Д. И., Максимович И. Б., Сарана Е. П.** Экспериментальное исследование проявлений термомеханических эффектов на линейной и нелинейной стадиях деформирования образцов каменной соли в режиме циклического нагружения // ФТПРПИ. — 2016. — № 6. — С. 15–22.
3. **Мохначев М. П.** Усталость горных пород. — М.: Наука, 1979. — 152 с.
4. **Fuenkajorn K., Phueakphum D.** Fatigue and dynamic energy behavior of rock subjected to cyclical loading, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 2009, Vol. 46. — P. 200–209.
5. **Кочарян Г. Г., Костюченко В. Н., Павлов Д. В.** Инициирование деформационных процессов в земной коре слабыми возмущениями // *Физ. мезомеханика*. — 2004. — Т. 1. — № 7. — С. 5–22.
6. **Курленя М. В., Адушкин В. В., Гарнов В. В., Опарин В. Н., Ревуженко А. Ф., Спивак А. А.** Знакопеременная реакция горных пород на динамическое воздействие // *ДАН*. — 1992. — Т. 323. — № 2. — С. 263–265.
7. **Kazantsev A. A., Kosykh V. P., Revuzhenko A. F.** Spectral analysis of granular material reaction to long-term weak dynamic effect, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2015, Vol. 91, 012089. doi: 10.1088/1757-899X/91/1/012089.
8. **Лавриков С. В., Ревуженко А. Ф.** Моделирование процессов деформирования самонапряженных образцов горных пород // ФТПРПИ. — 2017. — № 1. — С. 15–24.
9. **Lavrikov S. V., Revuzhenko A. F.** DEM code-based modeling of energy accumulation and RELEASE in structurally heterogeneous rock masses, *AIP Conference Proceedings*, 2015, 1683, 020121. doi: 10.1063/1.4932811.

Поступила в редакцию 1/XI 2017