



**ВЛИЯНИЕ МНОГОКРАТНЫХ СЛАБЫХ УДАРОВ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ И НА СКОРОСТЬ
РАСПРОСТРАНЕНИЯ УПРУГИХ ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН В ГЕОМАТЕРИАЛАХ**

Е. А. Запысова, В. П. Косых

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

Приведены результаты экспериментального исследования влияния многократных слабых ударов на ползучесть образца из эквивалентного геоматериала, нагруженного статической сжимающей нагрузкой. Установлено, что при длительных слабых ударах скорость ползучести вначале увеличивается, а затем уменьшается до стационарного значения. Слабые удары инициируют прохождение по образцу упругой волны деформации, скорость распространения которой, немонотонно возрастает с увеличением числа ударов. Показано, что это связано с изменением внутренней структуры образца вследствие воздействия внешних нагрузок.

Деформации, напряжения, слабые удары, скорость распространения продольных волн, геоматериал

**EFFECT OF MULTIPLE WEAK IMPACTS ON CREEP AND VELOCITY OF ELASTIC
LONGITUDINAL WAVE PROPAGATION IN GEOMATERIALS**

E. A. Zapysova and V. P. Kosykh

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: elenazapysova@mail.ru, v-kosykh@yandex.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

The results of an experimental study of the effect of multiple weak impacts on the creep of a sample of equivalent geomaterial loaded with a static pressure are presented. It is found that at long-term weak impacts, the creep rate initially increases and then decreases to a stationary value. Weak impacts initiate the elastic strain wave passing through the sample. The propagation velocity of this wave increases non-monotonically with an increase in the number of impacts. It is related to the change in sample internal structure due to external loads.

Strains, stresses, weak impacts, longitudinal wave propagation velocity, geomaterials

Известно, что деформационные и прочностные свойства геоматериалов зависят от условий нагружения и могут изменяться со временем. Например, при длительном действии статических нагрузок на горные породы происходит развитие деформаций ползучести и процессов релаксации напряжений [1–3]. Циклический характер изменения напряжений вызывает усталостное разрушение геоматериалов [4, 5]. Взрывные воздействия на горные породы сопровождаются их знакопеременной реакцией, проявляющейся в изменении знака действующих в массиве напряжений после очередного взрыва [6].

На характер пластических деформаций геоматериалов также оказывают влияние слабые вибрации. Они могут приводить как к концентрации напряжений на неоднородностях, так и к релаксации, что предопределяет разрушение [7, 8]. Микросейсмические колебания могут сыграть роль триггера и спровоцировать катастрофические проявления горного давления (стрельяние горных пород, толчки, горные удары и др.) [9, 10].

Блочно-зеренная структура, упругость блоков и возможность их относительного проскальзывания в сочетании с внутренним трением позволяют геоматериалам при определенных условиях нагружения аккумулировать и затем высвободить накопленную упругую энергию [11–13]. Например, периодическое накопление и высвобождение энергии в образцах геоматериалов могут вызвать длительные слабые динамические нагрузки, действующие совместно со статическими [14, 15]. Среда эволюционирует от одного равновесного состояния к другому, при этом в свойствах среды также могут происходить изменения.

В настоящей работе экспериментально исследовано влияние длительных слабых ударов на процесс ползучести в цилиндрическом образце из эквивалентного геоматериала и на скорость распространения в нем упругих продольных волн.

Методика экспериментов. Исследование проводили на трубчатом образце, изготовленном из экорезина (акриловый гипс), кварцевого песка (размер частиц 0.3 мм) и воды, смешанных в соотношении 100 : 100 : 28. Приготовленную смесь заливали в специальную форму и с помощью вакуумного насоса удаляли образовавшиеся в смеси пузырьки воздуха. Затвердевший образец сушили при комнатной температуре в течение суток, а затем при температуре 180°C — в течение двух часов. Общая длина образца составляла 120 мм, рабочая длина — 95 мм, внешний диаметр — 37 мм, внутренний — 15.4 мм.

Продольные статические деформации образца измеряли фольговыми тензорезисторами BF100-3AA с длиной базы 3 мм и сопротивлением 100 Ом, динамические деформации — полупроводниковыми тензодатчиками NU-101B-350 с длиной базы 5 мм и сопротивлением 350 Ом. Датчики наклеивались вдоль образца с шагом 24 мм (рис. 1).

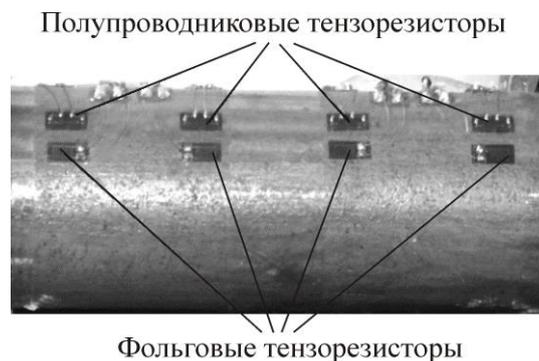


Рис. 1. Расположение тензорезисторов на образце

Эксперименты проводились на стенде, позволяющем исследовать изменение деформационно-прочностных характеристик образцов геоматериалов под воздействием слабых ударов, действующих на фоне заданной статической нагрузки. Конструкция узла нагружения стенда показана на рис. 2.

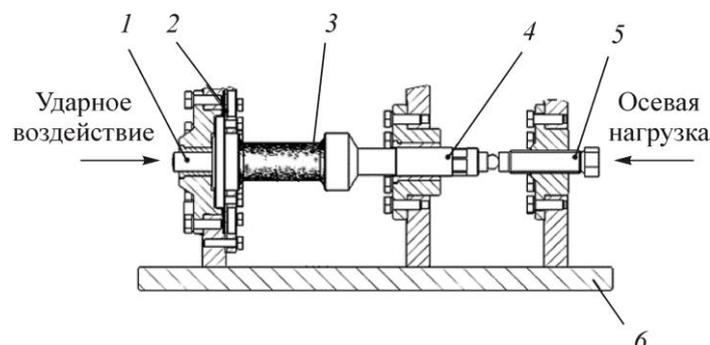


Рис. 2. Стенд для испытаний: 1 — подвижный зажим; 2 — мембрана; 3 — образец геоматериала; 4 — правый зажим; 5 — нагружающий винт; 6 — основание

Образец геоматериала 3 фиксируется в зажимах 1 и 4. Левый зажим 1 закреплен на вертикальной плите через мембрану 2 и центрируется с помощью фторопластовой втулки. Правый зажим 4 также центрируется фторопластовой втулкой и через шарик передает сжимающую нагрузку от винта 5 на образец 3. Вертикальные плиты жестко закреплены на массивном основании 6, помогающем предотвратить влияние случайных воздействий на систему извне. В процессе эксперимента на образец можно оказывать ударное воздействие известной энергии через хвостовик зажима 1. Измерительная часть стенда представлена крейтовой системой LTR-EU-8-2 фирмы L-Card, с помощью которой в течение всего эксперимента вели непрерывный сбор информации с тензометрических датчиков. Подробное описание стенда описано в [16].

Стенд с образцом помещали в короб-термостат, поддерживающим температуру $25 \pm 0.1^\circ\text{C}$ и выдерживали в течение двух суток. Затем образец нагружали винтом 5, одновременно записывая зависимости задаваемой сжимающей силы и возникающих в образце продольных деформаций от времени. По полученным результатам построен график зависимости напряжения от средней деформации сжатия $\bar{\varepsilon}_0$ (рис. 3). Величина $\bar{\varepsilon}_0$ определялась как среднее арифметическое деформаций, измеренных установленными фольговыми тензорезисторами (рис. 1).

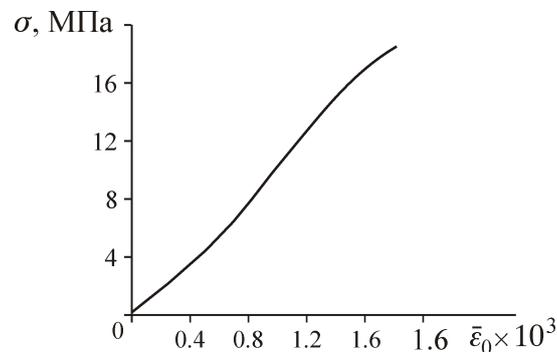


Рис. 3. Зависимость напряжения от средней деформации образца

Максимальная величина напряжения при нагружении составила 18.4 МПа. Образец в нагруженном состоянии выдерживали в течение 1100 ч, после чего, не снимая статическую нагрузку, включали источник ударов с частотой 1.2 Гц и продолжали эксперимент еще 1100 ч с непрерывной записью статической деформации образца и действующих в нем напряжений.

Полученные результаты. Общая деформация образца состоит из начальной деформации $\bar{\varepsilon}_0$, которая возникает мгновенно при приложении сжимающей силы и медленно нарастающей во времени деформации ползучести $\bar{\varepsilon}_t$. Значение $\bar{\varepsilon}_0$ соответствующее максимальному значению напряжений является постоянной величиной, равной 1.8×10^{-3} (рис. 3). Увеличение деформации ползучести $\bar{\varepsilon}_t$ в зависимости от времени показано на рис. 4а. Деформации $\bar{\varepsilon}_t$ и $\bar{\varepsilon}_0$ представляют собой результат усреднения показаний всех четырех датчиков (рис. 1).

Как видно из рис. 4а, деформация $\bar{\varepsilon}_t$ возрастает с переменной скоростью. Максимальная скорость наблюдалась в начале эксперимента, а затем, с увеличением времени, происходило постепенное снижение и через 600 ч скорость стала равной $5.8 \times 10^{-12} \text{ c}^{-1}$. В течение следующих 500 ч (до точки А на рис. 4) средняя скорость ползучести оставалась неизменной, поэтому деформация возрастала линейно.

Так как нагружающее устройство имеет конечную жесткость, то изменение деформации испытуемого образца сопровождается соответствующим изменением напряжений (рис. 4б) — с ростом деформации напряжения уменьшаются. По кривой напряжений видно наличие небольших флуктуаций скорости ползучести. Подобные отклонения скорости ползучести проявляются и на кривой деформации (рис. 4а), но они слабо выражены вследствие ограниченной чувствительности датчиков

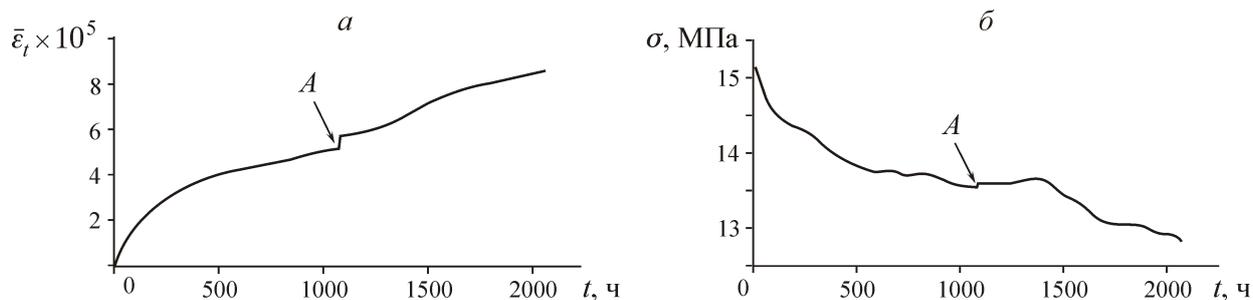


Рис. 4. Диаграмма изменения средней деформации $\bar{\varepsilon}_t$ образца (а) и напряжений (б) в зависимости от времени

На рис. 4а, б стрелкой А отмечен момент начала нанесения ударов. Удары возбуждают в системе “стенд – образец” упругие колебания и образец испытывает знакопеременные затухающие динамические деформации. Величина и форма импульса этих деформаций, считанные одним из установленных на образец полупроводниковых тензорезисторов, показана на рис. 5.

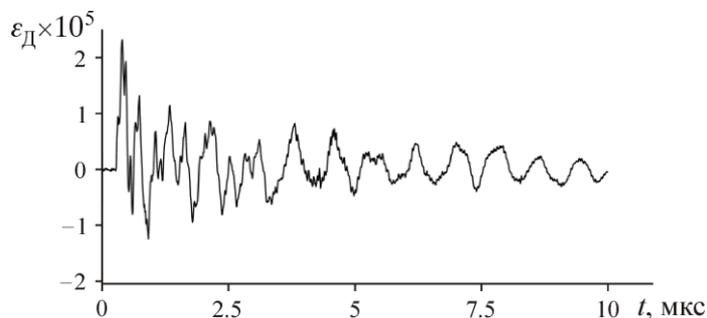


Рис. 5. Динамические деформации образца, возбуждаемые ударом

Возникающие от ударов динамические нагрузки действуют поверх статического сжатия и приводят к изменению в образце характера поведения деформации ползучести. На рис. 4а видно, что первые удары (точка А) вызывают резкий скачок деформации на величину порядка 10^{-6} . Затем деформация ползучести возрастает с переменной скоростью. В начале опыта в течение около 600 ч ударного воздействия (на рис. 4а, б это диапазон времени от 1100 до 1700 ч) скорость деформации увеличивается и затем, проходя через максимум, уменьшается и постепенно стабилизируется. В промежутке времени опыта от 1700 до 2100 ч средняя скорость ползучести составила $5.8 \times 10^{-12} \text{ с}^{-1}$, что не отличается от ее значения, полученного при отсутствии ударов, хотя напряжение сжатия уменьшилось с 14 до 13 МПа (рис. 4б).

Постепенное накопление деформаций ползучести свидетельствует об изменении внутренней структуры образца вследствие накопления повреждений со временем. Эти изменения могут проявляться в изменении механических свойств материала, например, его модуля упругости и следовательно скорости распространения упругих волн.

В той части эксперимента, где происходили ударные воздействия, вдоль образца при каждом ударе распространялся импульс упругой деформации (рис. 5), величина которого записывалась четырьмя полупроводниковыми тензодатчиками (рис. 1). Осциллограммы импульса, полученные от разных датчиков, были сдвинуты во времени. По величине этих сдвигов и расстоянию между установленными датчиками вычисляется скорость распространения упругой волны в образце (стержневая скорость). Подробнее методика измерения стержневой скорости описана в [13].

На рис. 6 представлены результаты измерения скорости продольных упругих волн в зависимости от времени проведения эксперимента. Начало отсчета времени на шкале соответствует началу нанесения ударов (точке *A* на рис. 4).

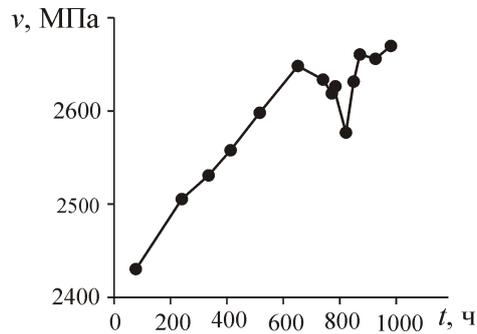


Рис. 6. Изменение скорости распространения продольной упругой волны в зависимости от времени

Скорость упругих волн по мере роста числа ударов изменяется. Вначале, в течение 700 ч она возрастает приблизительно на 10 %, а затем наблюдается ее падение и последующее возрастание.

ВЫВОДЫ

Дополнительное воздействие многократных слабых ударов изменяет характер процесса ползучести образцов из эквивалентного геоматериала, находящихся под действием статических сжимающих напряжений. Скорость ползучести сначала увеличивается, а затем, проходя через максимум, падает до стационарного значения. Скорость распространения упругих волн в образце из эквивалентного геоматериала, одновременно находящемся под действием статических сжимающих напряжений и длительных слабых ударов, немонотонно возрастает с увеличением времени эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/ REFERENCES

1. **Erzhanov Zh. S., Saginov A. S., Gumenyuk G. N. et al.** Creep of Rocks, Theory and Practice, Alma-Ata, Nauka, 1970. (in Russian) [Ержанов Ж. С., Сагинов А. С., Гуменюк Г. Н. и др. Ползучесть горных пород. Теория и практика. — Алма-Ата: Наука, 1970. — 208 с.]
2. **Baryakh A. A., Konstantinova S. A., and Asanov V. A.** Deformation of saline rocks, Yekaterinburg, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 1996, 202 pp. (in Russian) [Барях А. А., Константинова С. А., Асанов В. А. Деформирование соляных пород. — Екатеринбург: УрО РАН, 1996. — 202 с.]
3. **Svalov A. M.** Deformation characteristics of rocks in oil and gas reservoir development, Monitoring. Science and technology, 2011, vol. 3(8), pp. 84–90 (in Russian) [Свалов А. М. Деформационные свойства горных пород в процессах разработки месторождений нефти и газа // Мониторинг. Наука и технологии. — 2011. — Т. 3. — № 8. — С. 84–90.]
4. **Mokhnachev M. P.** Fatigue of Rocks, Moscow, Nauka, 1979, 152 pp. (in Russian) [Мохначев М. П. Усталость горных пород. — М.: Наука, 1979. — 152 с.]
5. **Sinev S. V.** Mechanisms, methodology and methods of destruction of rocks in roller drilling, Mining Informational and Analytical Bulletin, 2016, no. 1, pp. 149–159. (in Russian) [Синев С. В. Механизмы, методы и способы разрушения горных пород в шарошечном бурении // ГИАБ. — 2016. — № 1. — С. 149–159.]
6. **Kurlenya M. V., Adushkin V. V., Garnov V. V. et al.** Alternating response of rocks to dynamic impacts. Proceedings of the Academy of Sciences USSR, 1993, vol. 323(2), pp. 263–265. (in Russian) [Курленя М. В., Адушкин В. В., Гарнов В. В. и др. Знакопеременная реакция горных пород на динамическое воздействие // ДАН СССР. — 1993. — Т. 323. — № 2. — С. 263–265.]

7. **Trapeznikov Yu. A., Manzhikov B. Ts., Bogomolov L. M.** Effect of small weak vibrations on strain in rocks at constant load. *Volcanology&Seismology*, 2000, vol. 22(1), pp. 22–106. [**Трапезников Ю. А., Манжиков Б. Ц., Богомолов Л. М.** Влияние слабых вибраций на деформирование горных пород при постоянной нагрузке // *Вулканология и сейсмология*. — 2000. — № 1. — С. 66–71.]
8. **Kuksenko V. S., Manzhikov B. Ts., Tilegenov K. et al.** Trigger effect of weak vibrations in solids (rocks). *Physics of the Solid State*, 2003, vol. 45(12), pp. 2287–2291 [**Куксенко В. С., Манжиков Б. Ц., Тилегенов К. и др.** Триггерный эффект слабых вибраций в твердых телах (горных породах) // *Физика твердого тела*. — 2003. — Т. 45. — В. 12. — С. 2182–2186.]
9. **Kocharyan G. G., Kulyukin A. A., and Pavlov D. V.** Role of nonlinear effects in the mechanics of accumulation of small perturbations, *Physical Mesomechanics*, 2006, vol. 9, no. 1, pp. 5–14. (in Russian) [**Кочарян Г. Г., Кулюкин А. А., Павлов Д. В.** Роль нелинейных эффектов в механике накопления малых возмущений // *Физическая мезомеханика*. — 2006. — Т. 9. — № 1. — С. 5–14.]
10. **Deshcherevskii A. V., Lukk A. A., Mirzoev K. M., and Sidorin, A. Ya.** Potentiality of trigger effect of daily variations in microseismic vibrations on seismic process, *Nauka Tekhnol. Razrab.*, 2015, vol. 94, no. 4, pp. 16–29 (in Russian) [**Дещеревский А. В., Лукк А. А., Мирзоев К. М., Сидорин А. Я.** О возможности триггерного воздействия суточных вариаций микросейсмических колебаний на сейсмический процесс // *НТР*. — 2015. — Т. 94. — № 4. — С. 16–29.]
11. **Stavrogin A. N. and Shirkes O. A.** Aftereffect in rocks caused by preexisting irreversible deformations, *Journal of Mining Science*, 1986, no. 4, 235–244. [**Ставрогин А. Н., Ширкес О. А.** Явление последействия в горных породах, вызванное предшествующей необратимой деформацией // *ФТПРПИ*. — 1986. — № 4. — С. 16–27.]
12. **Moroz A. I.** Self-Stress State of Rocks, Moscow, MGGU, 2004, 288 pp. (in Russian) [**Мороз А. И.** Самонапряженное состояние горных пород. — М.: Изд-во МГГУ, 2004. — 288 с.]
13. **Lavrikov S. V. and Revuzhenko A. F.** Modeling deformation processes in self-stressed rock specimens. *Journal of Mining Science*, 2017, vol. 53, no. 1, pp. 12–20. [**Лавриков С. В., Ревуженко А. Ф.** Моделирование процессов деформирования самонапряженных образцов горных пород // *ФТПРПИ*. — 2017. — № 1. — С. 15–24.]
14. **Kosykh V. P. and Kosykh P. V.** Fluctuations of stresses in geomaterials during long-term weak dynamic impacts. In: *IV All-Russian Conference with International Participation on Trigger Effects in GeoSystems*, 176–182, Geos, Moscow (2017) (in Russian) [**Косых В. П., Косых П. В.** О флуктуациях напряжений в геоматериалах в процессе длительных слабых динамических воздействий // *Триггерные эффекты в геосистемах: материалы IV Всерос. конф. с Междунар. участием, 6–9 июня 2017*. — М.: Геос. — С. 176–182.]
15. **Kosykh V. P.** Effect of Multiple Weak Impacts on Evolution of Stresses and Strains in Geo-materials., *Trigger Effects in Geosystems*, Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences, https://doi.org/10.1007/978-3-030-31970-0_11.
16. **Kosykh, V. P., Kosykh, P. V., and Revuzhenko, A. F.** Test bench to study complex stress evolution in geomaterials under weak dynamic loads, *Journal of Mining Science*, 2017, no. 6, pp. 1147–1151. (in Russian) [**Косых В. П., Косых П. В., Ревуженко А. Ф.** Испытательный стенд для исследования эволюции сложного напряженно-деформированного состояния геоматериалов при слабых динамических воздействиях // *ФТПРПИ*. — 2017. — № 6. — С. 198–203.]