

## ГЕОМЕХАНИКА

УДК 539.3+517.95

### ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕЗИСА И ЭВОЛЮЦИИ НАРУШЕНИЙ СПЛОШНОСТИ В ГЕОМАТЕРИАЛАХ: ТЕОРИЯ И ЛАБОРАТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

**О. М. Усольцева, Л. А. Назарова, П. А. Цой, Л. А. Назаров, В. Н. Семенов**

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,  
Красный пр., 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Создан стенд для исследования процессов возникновения и развития нарушений сплошности в горных породах. На основе данных лабораторных испытаний искусственных геоматериалов и разработанной геомеханической модели эксперимента синтезировано уравнение состояния, описывающее сдвиговое деформирование нарушения.

*Массив горных пород, нарушение сплошности, испытательный стенд, эксперимент, упруго-пластическая модель, верификация, уравнение состояния*

#### ВВЕДЕНИЕ

Блочно-иерархическое строение — основополагающий фактор, определяющий деформирование и разрушение породных массивов [1, 2]. Для адекватного описания этих процессов необходимо знать физико-механические свойства структурных элементов массива — блоков и межблочных контактных границ (нарушений сплошности). Свойства последних определяются, как правило, в лабораторных условиях на кернах, выбуренных вкрест простирания разлома [3, 4]. Значительно меньше публикаций посвящено исследованию процессов генезиса разломных структур с позиций установления их геомеханических характеристик. В основном это лабораторные эксперименты на эквивалентных материалах с последующим “переносом” результатов на реальные объекты с использованием критериев подобия [5–8].

В настоящей работе предложен подход, позволяющий установить определяющие соотношения для вновь образовавшихся нарушений сплошности, а также описаны изготовленный стенд и методика проведения лабораторных экспериментов.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В декартовой системе координат  $(x, y)$  рассмотрим прямоугольную область  $D$  с размерами  $2L_x \times L_y$  (рис. 1), содержащую две узкие вертикальные зоны  $J$  (шириной  $\Delta$ ) с пониженными прочностными характеристиками. На участке  $[-a, a]$  верхней границы  $y = 0$  приложено пере-

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-05-01057) и Интеграционного проекта Сибирского отделения РАН № 100.

Экспериментальные исследования проводились на оборудовании ЦКП ГГИ СО РАН.

менное вертикальное смещение  $W$  (жесткое нагружение), нижняя граница  $y = L_y$  на участках  $[-L_x, -a - \Delta]$  и  $[a + \Delta, L_x]$  неподвижна в вертикальном направлении, остальные части горизонтальных границ свободны от напряжений. На боковых границах заданы постоянные горизонтальные напряжения  $\sigma_H$ .

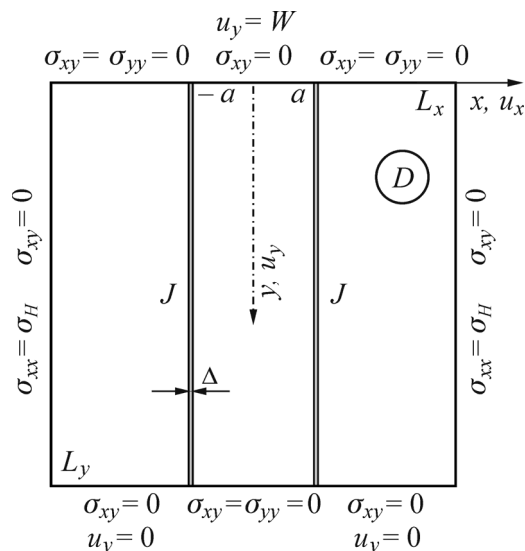


Рис. 1. Схема расчетной области и граничные условия, моделирующие условия эксперимента;  $J$  — зоны с пониженными прочностными свойствами

Деформирование  $D$  описывается уравнениями равновесия

$$\sigma_{ij,j} = 0, \tag{1}$$

законом Гука

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}, \tag{2}$$

в зонах упругости, а в пластических областях — инкрементальной моделью [9] с условием Кулона – Мора

$$\sqrt{0.25(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + \sigma_{xy}^2} = 0.5(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \operatorname{tg} \varphi + \tau_c, \tag{3}$$

где  $\varphi$  и  $\tau_c$  — угол внутреннего трения и сцепление. В (1)–(3)  $\sigma_{ij}$  — напряжения, ( $i, j, k = x, y$ ), по повторяющимся индексам производится суммирование;  $\varepsilon_{ij} = 0.5(u_{i,j} + u_{j,i})$  — деформации;  $u_i$  — смещения;  $\lambda$  и  $\mu$  — параметры Ламе.

Система (1)–(3) с граничными условиями на  $\partial D$ , показанными на рис. 1, решалась методом конечных элементов с использованием оригинального кода [10].

#### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводились на гипсовых образцах размерами  $50 \times 50 \times 11$  мм. Для реализации предложенной схемы испытаний (рис. 1) на основе сервогидравлического пресса INSTRON 8802 был изготовлен стенд, позволяющий осуществлять независимое контролируемое нагружение в вертикальном и горизонтальном направлениях, с одновременной регистрацией микросмещений на поверхности образца с помощью оптико-телевизионного комплекса ALMEC-tv.

Принцип работы комплекса основан на интерпретации оптических изображений микро-рельефа поверхности нагружаемого объекта. Поверхность последнего освещается разведенным пучком когерентного излучения для получения спекл-картины. Спеклы “привязаны” к соответ-

ствующим точкам поверхности и при деформации меняют положение вместе с ними. Видеокамера фиксирует эти смещения в режиме покадровой съемки. Комплекс регистрирует параметры процесса в реальном времени с частотой до 27 кадров в секунду при пространственном разрешении не хуже 1 мкм. После программной обработки на выходе получают координаты и величину смещений точек поверхности образца с временной привязкой, что позволяет вычислять компоненты тензора деформаций.

Для удобства интерпретации результатов на поверхность образца наносилась квадратная сетка. На рис. 2а представлен образец после проведения эксперимента, а на рис. 2б — фрагмент спекл-фотографии.

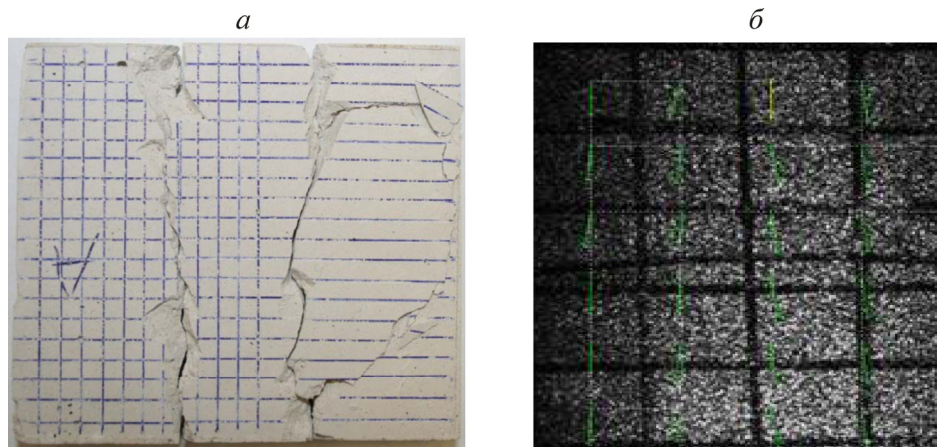


Рис. 2. Разрушенный в процессе эксперимента образец (а); фрагмент спекл-фотографии (б)

### ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ

Деформационные и прочностные свойства материала, из которого изготавливались образцы, определялись по стандартной методике [11] и оказались следующими: модуль Юнга 991 МПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0.311$  (тогда  $\lambda = 622$  МПа и  $\mu = 378$  МПа), угол внутреннего трения  $\varphi = 23^\circ$ , сцепление  $\tau_c = 2.03$  МПа. Геометрические параметры образцов:  $L_x = 30$  мм,  $L_y = 60$  мм, толщина  $L_z = 11$  мм,  $a = 10$  мм. Поскольку  $L_z$  значительно меньше  $L_x$  и  $L_y$ , расчеты проводились для модели плоского напряженного состояния [12], поэтому в (2) параметр  $\lambda$  заменялся на  $\lambda_* = \lambda(1 - 2\nu)/(1 - \nu) = 341$  МПа.

Для создания зон  $J$  на тыльной стороне образцов выполнялись вертикальные пропилы глубиной 3 мм, что понижало эффективные прочностные характеристики  $J$  по сравнению с  $\varphi$  и  $\tau_c$ , следовательно необходимо оценить значения последних в ослабленных зонах. На рис. 3 сплошной черной линией показано экспериментальное значение среднего напряжения  $\sigma_V(W)$  на участке приложения нагрузки (вычислялось из соотношения  $\sigma_V = F_y/(2aL_z)$ , где  $F_y$  — зарегистрированное вертикальное усилие на пуансоне нагружающего устройства). Точка  $(W_m, \sigma_m)$  показывает момент, когда всюду вдоль  $J$  материал перешел в пластическое состояние.

Поскольку эксперименты проводились при  $\sigma_H = 0$ , то значение  $\varphi$  практически не влияло на  $\sigma_V$ , поэтому в численных расчетах угол внутреннего трения в  $J$  полагался равным  $23^\circ$ , а величина сцепления подбиралась. На рис. 3 серая линия, полученная при значении  $\tau_c = 1.62$  МПа в ослабленной зоне, — теоретическая зависимость

$$\bar{\sigma}_{yy} = \frac{1}{2a} \int_{-a}^a \sigma_{yy}(x,0) dx,$$

которая хорошо соответствует экспериментальной. Для сравнения штриховой линией показано среднее напряжение  $\bar{\sigma}_{yy}$ , рассчитанное по упругой модели.

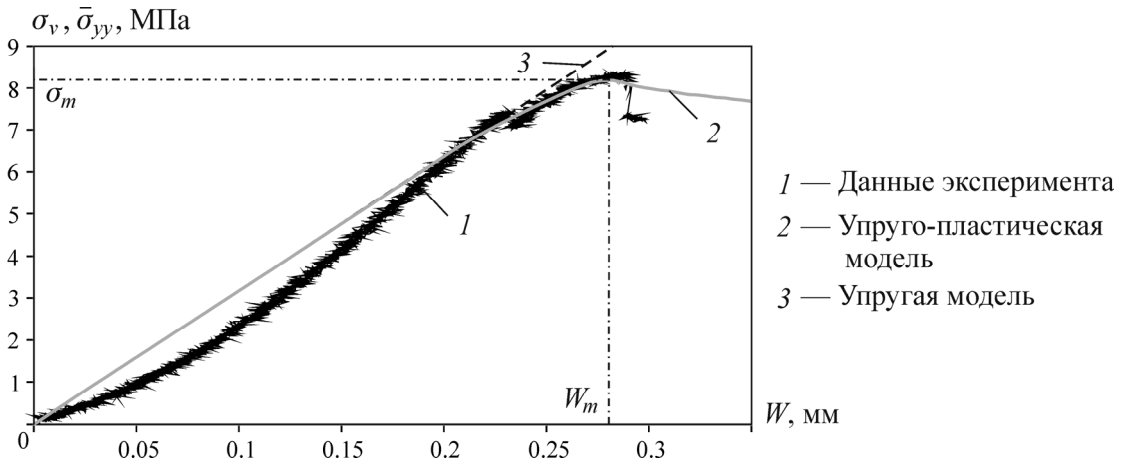


Рис. 3. Зависимость вертикальных напряжений  $\sigma_V$  на верхней границе образца от смещения  $W$  траверсы нагружающего устройства

На рис. 4а показан пример интегрального анализа данных, зарегистрированных комплексом ALMEC-tv при  $W = 0.24$  мм, когда верхний и нижний участки зон  $J$  перешли на запредельную стадию деформирования.

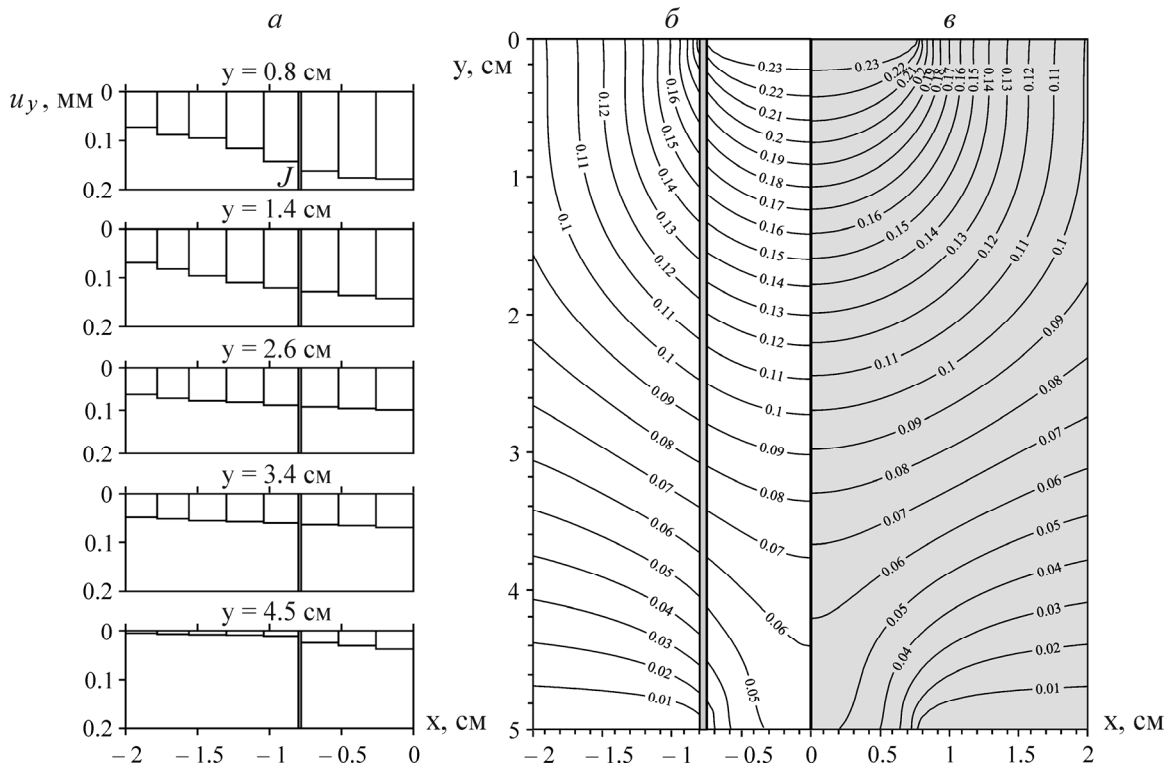


Рис. 4. Распределение вертикальных смещений  $u_y$  при  $W = 0.24$  мм: а — экспериментальные данные; б — упруго-пластическая модель; в — упругая модель

В каждом квадрате (см. рис. 2а) выполнялось осреднение поля смещений и в сечениях  $y = \text{const}$  (соответствующим ординатам середины горизонтального ряда квадратов) строились столбчатые диаграммы распределения вертикальных смещений. Здесь четко выделяются сегменты  $J$ , где имеет место разрыв вертикальных смещений — проскальзывание берегов нарушения сплошности.

На рис. 4б приведены изолинии  $u_y$  при том же значении  $W$ . Можно видеть хорошее количественное соответствие результатов эксперимента и теоретических расчетов, что позволяет использовать построенную теоретическую модель для дальнейшей оценки свойств образовавшихся разрывных нарушений.

На рис. 4в для сравнения показано распределение вертикальных смещений  $u_y$ , полученное по упругой модели (здесь и далее рисунки с такими расчетами затонированы).

Рисунок 5 демонстрирует изолинии  $u_y$  при  $W = W_m$ , иллюстрирующие ситуацию, когда всюду вдоль  $J$  наступила стадия пластического деформирования, а кривая  $\sigma_V(W)$  переходит на ниспадающую ветвь (см. рис. 3).

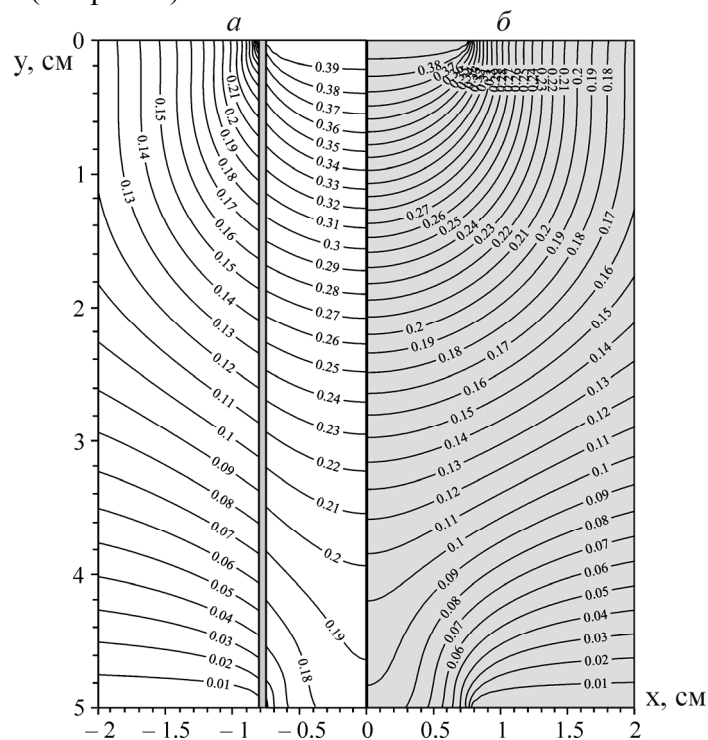


Рис. 5. Распределение вертикальных смещений  $u_y$  (мм) при  $W = W_m$ : а — упруго-пластическая модель; б — упругая модель

#### ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ НАРУШЕНИЙ СПЛОШНОСТИ

Типичная аппроксимация диаграммы деформирования [3] нарушения сплошности в касательном направлении  $\tau = \tau(S)$  ( $\tau$  — касательное напряжение,  $S$  — проскальзывание берегов) состоит из двух участков:

- упругого, наклон которого к оси  $S$  определяется касательной жесткостью  $K_t$ ;
- горизонтального — остаточной прочности  $\tau_r$ , зависящей от нормального к нарушению напряжения  $\sigma_n$ , как правило, по закону Кулона–Мора

$$\tau_r = \sigma_n \operatorname{tg} \varphi_* + \tau_*, \quad (4)$$

где  $\varphi_*$  и  $\tau_*$  — угол внутреннего трения и сцепление нарушения.

Оценим  $K_t$ ,  $\varphi_*$  и  $\tau_*$  для нарушения сплошности, образовавшегося в рассматриваемом модельном геоматериале при запредельном деформировании. Для этого проведем серию численных экспериментов для различных значений внешнего горизонтального сжатия  $\sigma_H$  (см. рис. 1). Здесь в качестве  $\tau$  выступает касательное напряжение  $\sigma_{xy}$  вдоль  $J$ . Изолинии  $\sigma_{xy}$  при  $\sigma_H = 2$  МПа и  $W = 0.4$  мм представлены на рис. 6а. Заметим, что напряжения  $\sigma_{xy}$  непрерывны при переходе через  $J$ , а их распределение незначительно отличается от такового для упругой задачи (рис. 6б).

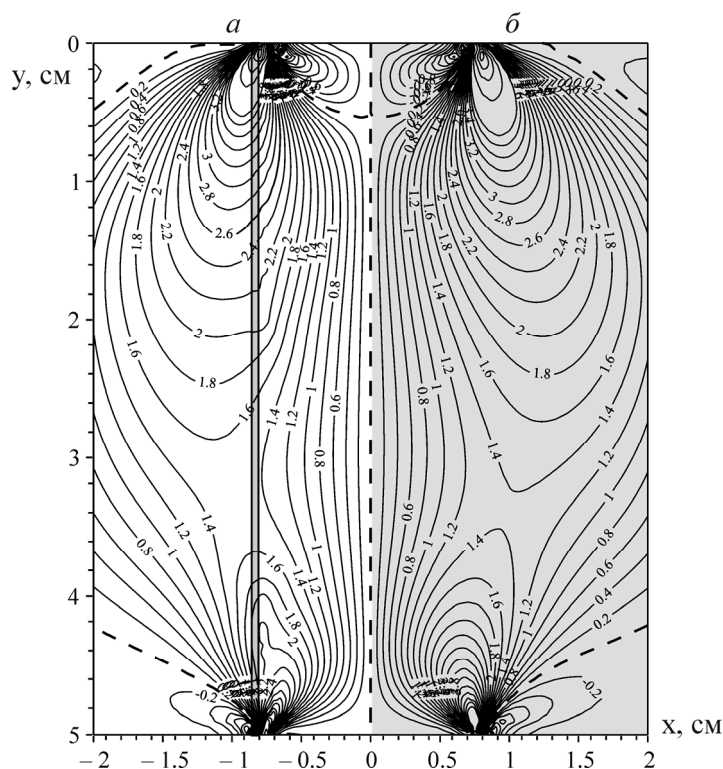


Рис. 6. Распределение касательных напряжений  $\sigma_{xy}$  (МПа) в модельной области при  $\sigma_H = 2$  МПа и  $W = 0.4$  мм

На рис. 7 приведены зависимости  $\tau = \tau(S)$  при  $y = 0.4L_y$  и различных значениях  $\sigma_H$ , при этом касательное напряжение и проскальзывание вычислялись из соотношений  $\tau = 0.5[\sigma_{xy}(a, y) + \sigma_{xy}(a + \Delta, y)]$  и  $S = u_y(a + \Delta, y) - u_y(a, y)$ . Кружками помечены моменты перехода рассматриваемого элемента  $J$  в запредельное состояние (по сути, момент зарождения разрыва в изначально сплошной среде).

В таблице показаны (выборочные результаты из 20 численных экспериментов, проведенных при  $0 \leq \sigma_H \leq 2$  МПа) характерные точки кривых  $\tau(S)$ :  $(S_e, \tau_e)$  — возникновение разрыва,  $(S_r, \tau_r)$  — переход на участок остаточной прочности. В шестой колонке — вычисленная из соотношения (см. рис. 7)

$$K_t = \frac{\tau_r - \tau_e}{S_r - S_e} \quad (5)$$

касательная жесткость нарушения. Отметим, что величина  $K_t$  практически не зависит от  $\sigma_H$ . В [13] предложена формула

$$K_t = \mu / \Delta, \quad (6)$$

которая в нашем случае дает значение жесткости 750 ГПа/м, что почти на порядок превышает найденное по (5). Таким образом (6) может служить верхней оценкой касательной жесткости нарушений сплошности в породном массиве.

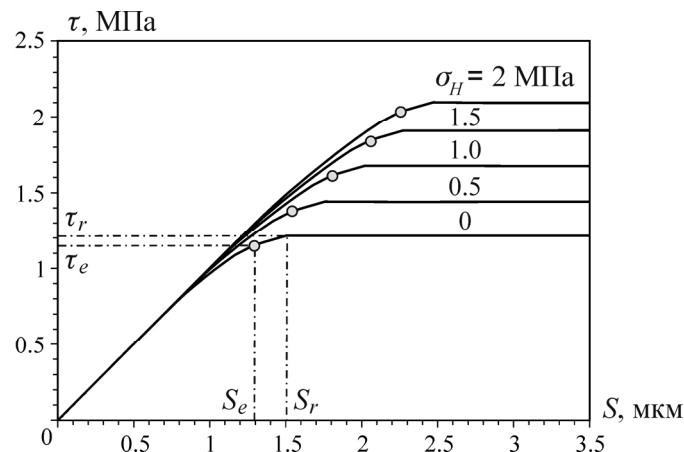


Рис. 7. Зависимость касательных напряжений  $\tau$  на нарушении сплошности от проскальзывания берегов  $S$  при различных горизонтальных напряжениях  $\sigma_H$  на боковых границах модели

Параметры нарушения сплошности

$\sigma_H$ , МПа	$S_e$ , мкм	$\tau_e$ , МПа	$S_r$ , мкм	$\tau_r$ , МПа	$K_t$ , ГПа/м
1	2	3	4	5	6
0	1.294	1.154	2.010	1.225	99.1
1	1.832	1.597	2.295	1.643	99.3
2	2.334	2.039	2.798	2.087	99.1

Для определения прочностных характеристик нарушения методом наименьших квадратов были обработаны данные, пример которых см. в таблице (колонки 1, 5). Оказалось,  $\varphi_* = 13.4$  и  $\tau_* = 0.94$  МПа, что примерно вдвое меньше соответствующих значений  $\varphi$  и  $\tau_c$  модельного геоматериала. Для сравнения приведем свойства шероховатых нарушений сплошности в слабых песчаниках [14]: касательная жесткость  $K_t = 1.43$  ГПа/м, остаточная прочность на сдвиг  $\tau_* = 0.216$  МПа. Таким образом, повышенные значения  $K_t$  и  $\tau_*$  — характерная особенность вновь образующихся разрывных нарушений.

## ВЫВОДЫ

1. Разработан и экспериментально обоснован подход, позволяющий построить определяющие уравнения деформирования нарушений сплошности, образующихся при разрушении породных массивов.

2. На основе сервогидравлического пресса INSTRON и оптико-телевизионного комплекса ALMEC-tv создан стенд для исследования полей смещений и деформаций на микроуровне при двухосном нагружении геоматериалов.

3. Выполненные лабораторные испытания гипсовых образцов показали, что возникающие в массиве горных пород разрывные нарушения обладают повышенными сдвиговой жесткостью и остаточной касательной прочностью.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Садовский М. А., Болховитинов Л. Г., Писаренко В. Ф. Деформирование среды и сейсмический процесс. — М.: Наука, 1987.
2. Опарин В. Н., Кулаков Г. И., Дядьков П. Г. и др. Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008.
3. Barton N. R. Deformation phenomena in jointed rock, *Geotechnique*, 1986, Vol. 36, No 2.
4. Pariseau W. G. Design Analysis in Rock Mechanics, 2nd ed., CRC Press, Taylor&Francis Group, London.
5. Шерман С. И., Борняков С. А., Буддо В. Ю., Трусков В. А., Бабичев А. А. Моделирование механизма образования сейсмоактивных разломов в упруго-вязкой среде // Геология и геофизика. — 1985. — №10.
6. Экспериментальная тектоника в теоретической и прикладной геологии. — М.: Наука, 1985.
7. Paterson M. S. Problems in the extrapolation of laboratory geological data, *Tectonophysics*, 1987, Vol. 133, No 1-2.
8. Ребецкий Ю. Л. Тектонические напряжения и прочность природных массивов. — М.: ИКЦ “Академкнига”, 2007.
9. Николаевский В. Н. Геомеханика и флюидодинамика. — М.: Недра, 1996.
10. Назарова Л. А., Назаров Л. А., Козлова М. П. Роль дилатансии в формировании и эволюции зон дезинтеграции в окрестности неоднородностей в породном массиве // ФТПРПИ. — 2009. — № 5.
11. ГОСТ 28985-91, 21153.8-88, 21153.3-85, 21153.2-84.
12. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела. — М.: Наука, 1979.
13. Юфин С. А. Механические процессы в природном массиве и их взаимодействие с подземными сооружениями: автореф. дис. ... докт. техн. наук. — М.: МГИ, 1991.
14. Nakagawa N., Jiang Y., Kawakita M. et al. Evaluation of mechanical properties of natural rock joints for discontinuous numerical analysis, *Proc. of the ISRM Int. Symp. 3rd ARMS*, Millpress, Rotterdam, 2004.

*Поступила в редакцию 12/IX 2012*