

УДК 624.131.21+539.37

**ТРИГГЕРНОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ РАЗРЯДКИ
УПРУГОЙ ЭНЕРГИИ В НАПРЯЖЕННОЙ ГЕОСРЕДЕ**

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

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

Разработаны и изготовлены экспериментальный стенд и средства измерений для моделирования динамических подвижек границ разломной зоны горных пород, разделенных прослойкой предварительно напряженной сыпучей среды, при триггерной разгрузке. В качестве триггера использована слабая сейсмическая волна от одиночного точечного удара. Выявлена связь возникающих скачков смещений со сбросом усилий. Показано, что мягкое нагружение более энергоемко и при разрядке приводит к меньшим сбросам усилий, но большим подвижкам. Установлено, что причиной инициирования смещений является волна разгрузки, уменьшающая контактное трение в среде.

Срез, триггерные эффекты, мягкое нагружение, разломы, трение, скольжение

Известно, что напряжения, действующие в земной коре, непрерывно изменяются и могут достигать предельных значений. В этом случае происходит их разрядка, которая может быть “мгновенной” либо медленной. Для выяснения механизма таких процессов большой интерес представляет моделирование на материалах с известными свойствами. Например, эксперименты на приборах прямого среза [1, 2] показали, что при мягком равномерном нагружении деформирование материала становится неустойчивым и прерывистым. Скачкообразное развитие сдвигов в горных породах экспериментально и теоретически рассматривалось в работах [3, 4].

Разрядка статически напряженного массива может провоцироваться малыми возмущениями (триггерным эффектом) от различного рода сотрясений, взрывов, вибраций и т. п. [5]. Одним из возможных типов триггерных воздействий на тектонические разломы является уменьшение трения между бортами. Существуют четыре основных способа этого типа: изменение сил трения между бортами разлома за счет закачки в разломную зону флюида; воздействие на разлом ударной волны; “подрезка” края разрыва (геометрическое ослабление прочности); уменьшение трещиностойкости среды [6]. В настоящем исследовании в качестве триггера использовано воздействие слабой сейсмической волны.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-05-00540).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

При моделировании динамических подвижек использовалась прослойка кварцевого песка, помещенного между жесткими пластинами (пластинами). Схема нагружения и общий вид устройства приведены на рис.1. Металлическая подвижная пластина 1, погруженная в сыпучий материал, под действием сдвигающих усилий T , создаваемых винтом через пружину 2, могла горизонтально смещаться по направлению Ox на величину S относительно двух других подвижных пластин 3. Введение в схему нагружения пружин разной жесткости (мягкое нагружение) имитировало упругость бортов разлома при их контактном сдвиговом взаимодействии. В устройстве имеется возможность изменения расстояния L между пластинами. В качестве наиболее удаленных неподвижных пластин использовались боковые стенки камеры 4 для сыпучего материала (рис. 1б), в качестве триггерного устройства — сейсмоисточник 7 в виде физического маятника. Длина нити маятника 300 мм, масса шарика 35 г. Одиночный удар наносился по боковой стенке камеры 4 на уровне центра пластины.

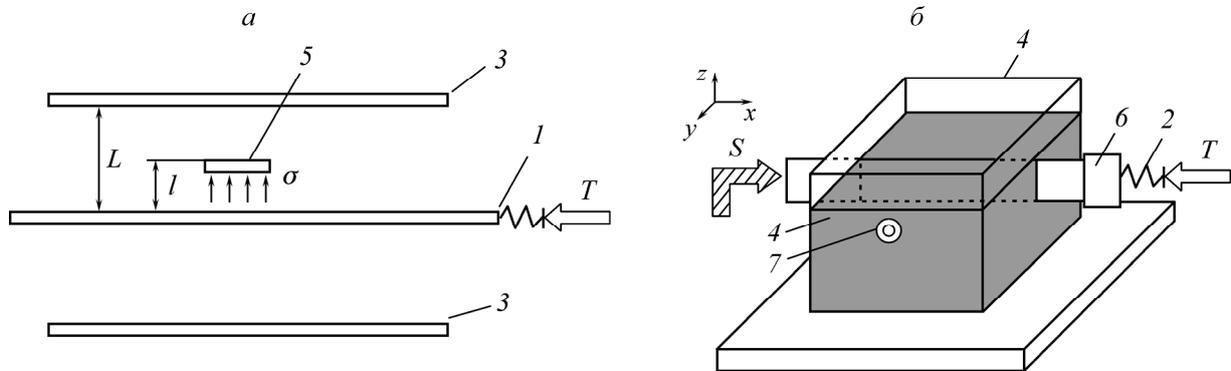


Рис. 1. Экспериментальный стенд: а — схема нагружения (вид сверху); б — общий вид устройства

Нормальные горизонтальные напряжения σ измерялись “плавающим” датчиком 5, установленным в сыпучей среде на заданном расстоянии от пластины. Касательные усилия T (напряжения τ) на подвижной пластине 1 определялись датчиком 6, закрепленным на ее торце.

ПОДГОТОВКА ОБРАЗЦОВ

Особое внимание было уделено обеспечению однородности структуры сыпучей среды, поскольку изначально имеющаяся неоднородность от опыта к опыту может привести к недостаточной воспроизводимости результатов. Рассмотрим методику получения образцов с одинаковыми механическими свойствами. Известно, что одна и та же сыпучая среда может иметь множество состояний, характеризующихся различными упаковками частиц. Случайные упаковки, возникающие, например, при засыпке материала в испытательную камеру, как правило, содержат множество дефектов с хаотическим распределением их по объему. Их можно считать изотропными с хорошим приближением. Действительно, сдвиг в любом направлении такого материала дает одинаковый результат по напряжениям и дилатансии. Однако уже после первого сдвига среда приобретает механическую анизотропию (наведенная анизотропия). Если материал деформируется по неизменной траектории многократно, то степень анизотропии возрастает как при увеличении числа циклов деформирования, так и при уменьшении амплитуды сдвига. Максимальная степень анизотропии достигается при переходе материала в стационарное состояние, характеризующееся стабилизацией всех параметров деформирования [7–9].

В экспериментах перед каждым опытом материал предварительно деформировался знакопеременными сдвигами на малых амплитудах. Амплитуда медленного циклического сдвига пластины составляла 1.5 мм, число циклов равнялось 50. Такая методика позволила получать практически одинаковые от опыта к опыту исходные упаковки частиц.

Поскольку триггерное воздействие имеет малую величину, состояние сыпучего образца, где проявляется эффект скачкообразной разгрузки, должно быть достаточно близким к предельному. В экспериментах предельное состояние достигалось предварительным смещением пластины до значений, когда на возрастающей ветви диаграммы нагружения касательные усилия T становились максимальными.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 2 приведена диаграмма касательного усилия T при нагружении с последующей триггерной разгрузкой. Диаграмма получена при следующих входных параметрах: жесткость пружины $W = 9$ кН/м, энергия единичного удара $U = 4.55 \cdot 10^{-3}$ Дж, пригрузка на свободную поверхность образца $p = 60.8$ Па (на рисунке не показана). Исходная точка a начала триггерной разгрузки лежит на участке диаграммы предельного состояния и соответствует максимальному сжатию пружины.

Под воздействием на сыпучую среду серии импульсов от сейсмоисточника возникают скачки смещений пластины. На диаграмме участок ab соответствует разгрузке, состоящей из 20 ступеней одинаковых триггерных воздействий. Напряженно-деформированное состояние образца после каждого триггерного воздействия отображается на плоскости точкой.

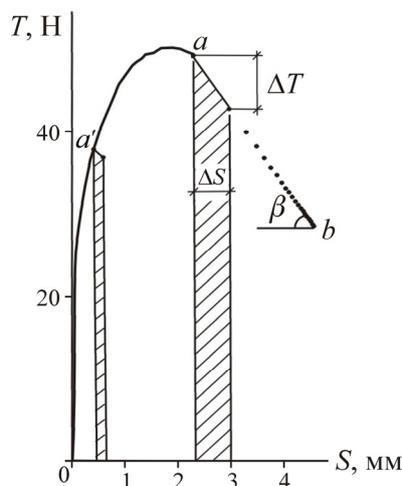


Рис. 2. Диаграмма нагружения – разгрузки при триггерном воздействии и высвобождение энергии на разных стадиях деформирования

Как видно, разгрузка аппроксимируется прямой с углом наклона β , где $\operatorname{tg} \beta = W$ характеризует жесткость всей системы нагружения.

Известно, что процесс деформирования блочной структуры зависит от касательной и нормальной составляющих жесткостей контакта, характеризующих связь между напряжениями и деформациями [10–13]. Полученное в экспериментах постоянство значений в отношениях приращений усилий ΔT и смещений пластины ΔS на диаграммах триггерной разгрузки означает, что внутреннее трение материала, контактирующего с пластиной, уменьшается под воздействием сейсмической волны от триггера.

Разгрузим триггером систему заранее, когда недогруженная до предельного состояния a сыпучая среда разгружается на возрастающей ветви диаграммы в точке a' . Соответствующая диаграмма получена в отдельном опыте и затем наложена на предельную кривую деформирования. Видно, что высвободившаяся упругая энергия в недогруженном состоянии (точка a') меньше, чем в случае предельного состояния (точка a).

В естественных условиях процесс накопления упругой энергии может занимать несколько десятков, а то и сотен лет, но в любом случае процесс должен закончиться достижением предельно возможных значений напряжений и их разрядкой, приводящей к катастрофическим последствиям. По поводу землетрясений уместно привести следующее высказывание: “А. Д. Сахаров и Э. Теллер предложили устраивать небольшие ядерные взрывы, создающие небольшие землетрясения, разрушающие концентрацию упругой энергии в породе. Однако прежде нужно понять, насколько близка концентрация упругой энергии к критической: слишком ранний взрыв будет неэффективным, а слишком поздний может привести к сильному землетрясению. Как организовать мониторинг плотности упругой энергии и найти подходящий момент для превентивного взрыва?” [14].

Ранняя разрядка используемой в эксперименте схемы аккумуляирования энергии опережающим триггерным воздействием позволяет уменьшить величину высвобождаемой упругой энергии по сравнению с критическим состоянием среды приблизительно в 5.5 раз (рис. 2).

Далее исследовалось влияние энергии триггерных внешних воздействий (амплитуды импульсов) на диаграммы разгрузки. Зависимость величины сброса усилий от порядкового номера динамического воздействия хорошо аппроксимируется степенной функцией (рис. 3). Установлено, что триггерное воздействие с меньшей энергией (1) по сравнению с большей (3) приводит к меньшей скорости разгрузки. В приведенных на рис. 3 экспериментах отношение энергий импульсных воздействий равнялось 26.

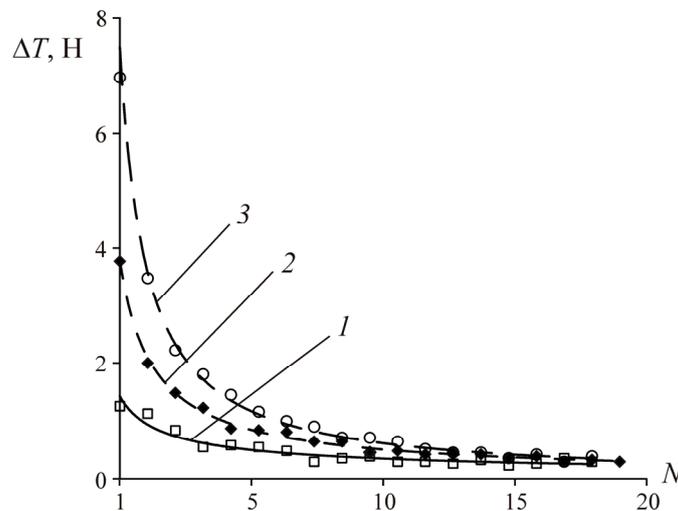


Рис. 3. Величина сбросов усилий при триггерной разгрузке в зависимости от порядкового номера удара для трех значений энергии триггерного воздействия U , Дж· 10^{-3} : 1 — 0.175; 2 — 1.4; 3 — 4.55

Полученная закономерность объясняется тем, что слабое воздействие менее эффективно уменьшает внутреннее трение и таким образом в большей степени сохраняется статическая жесткость сыпучей среды, хотя триггерный эффект в этом случае также присутствует.

На рис. 4 приведены диаграммы, в которых разгрузка осуществлялась триггером с постоянной энергией ударов $U = 2.45 \cdot 10^{-3}$ Дж при двух значениях жесткостей пружин и постоянной пригрузкой образца $p = \text{const} = 23.4$ Па. Видно, что большая жесткость пружины вызыва-

ет увеличение угла наклона разгрузочных диаграмм β , т. е. меньшая жесткость пружины при разгрузке приводит к меньшим сбросам усилий ΔT , но к большим скачкам смещений ΔS . При первом триггерном воздействии отношение этих приращений на диаграммах соответственно равно 0.46 и 2.37. После 20 импульсных воздействий суммарная высвободившаяся энергия на диаграмме рис. 4а в 4 раза превосходит энергию разрядки на рис. 4б, хотя разгрузка в первом случае оказалась меньшей.

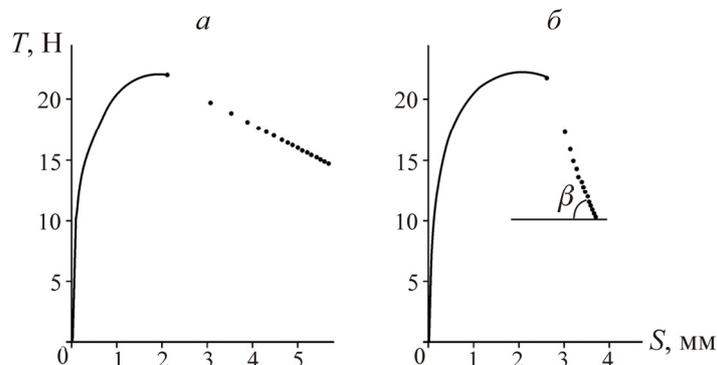


Рис. 4. Предельные диаграммы деформирования с разгрузкой при двух значениях жесткостей пружин W , кН/м: а — 1.61; б — 9

Величина сбросов усилий в зависимости от порядкового номера N удара в этих опытах в двойном логарифмическом масштабе показана на рис. 5. Она также может быть описана степенной функцией, причем показатель степени слабо зависит от жесткости системы нагружения.

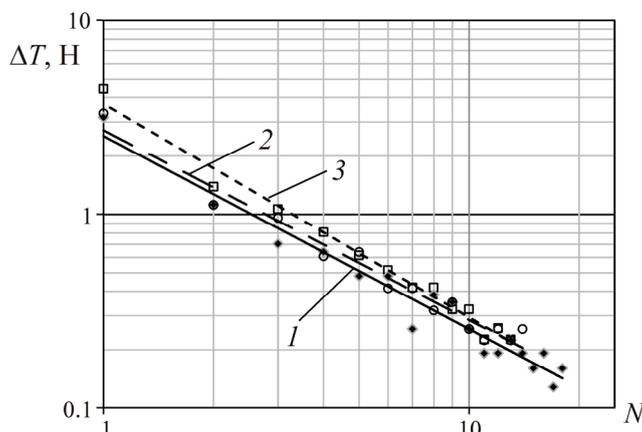


Рис. 5. Величина сбросов усилий при триггерной разгрузке в зависимости от порядкового номера удара. Жесткость нагружающего устройства W , кН/м: 1 — 1.61; 2 — 4.5; 3 — 9

На рис. 6 представлена зависимость изменения величины энергии скачков разгрузки кварцевого песка в предельном исходном состоянии от порядкового номера триггерного воздействия серии из 20 импульсов с постоянной энергией $U = 4.55 \cdot 10^{-3}$ Дж (давление $p = 46.8$ Па, жесткость пружины $W = 5.5$ кН/м). Полученная зависимость хорошо описывается степенной функцией (см. рис. 6а, б). В природных землетрясениях в начальный период наблюдается быстрый спад энергии, в конце серии энергия повторных толчков уменьшается вплоть до полного затухания. Результаты триггерной разгрузки, полученные на модели, не противоречат данным, полученным в естественных условиях.

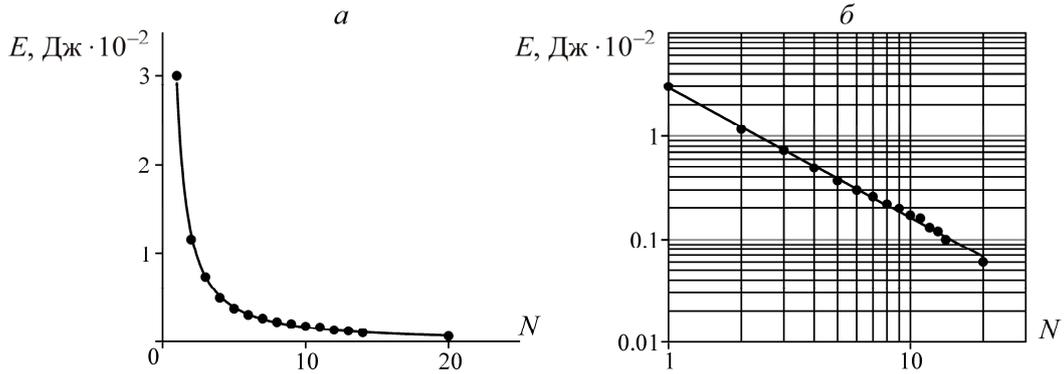


Рис. 6. Энерговыведение в зависимости от порядкового номера триггерного воздействия

Рассмотрим динамику процесса разрядки напряженного материала при триггерном воздействии. На рис. 7 приведены параметры одиночного импульса в сыпучей среде, измеренные акселерометром, в результате которого провоцируется скачок смещений бортов разлома. Запись произведена во времени, масштаб которого на последнем графике (рис. 7в) по сравнению с первыми двумя уменьшен в 20 раз. Видно, что импульс триггера (а) проходит через сыпучую среду (б) на пластину с некоторой задержкой Δt . Величина задержки, измеренная по передним фронтам импульсов, составляет 0.4 мс, а скорость прохождения волны в сыпучей среде на дистанции 50 мм — 125 м/с. Амплитуда импульса от триггера при прохождении указанного расстояния затухает почти в 100 раз, форма импульса изменяется — положительный фронт волны сжатия и отрицательная волна разгрузки расширяются во времени.

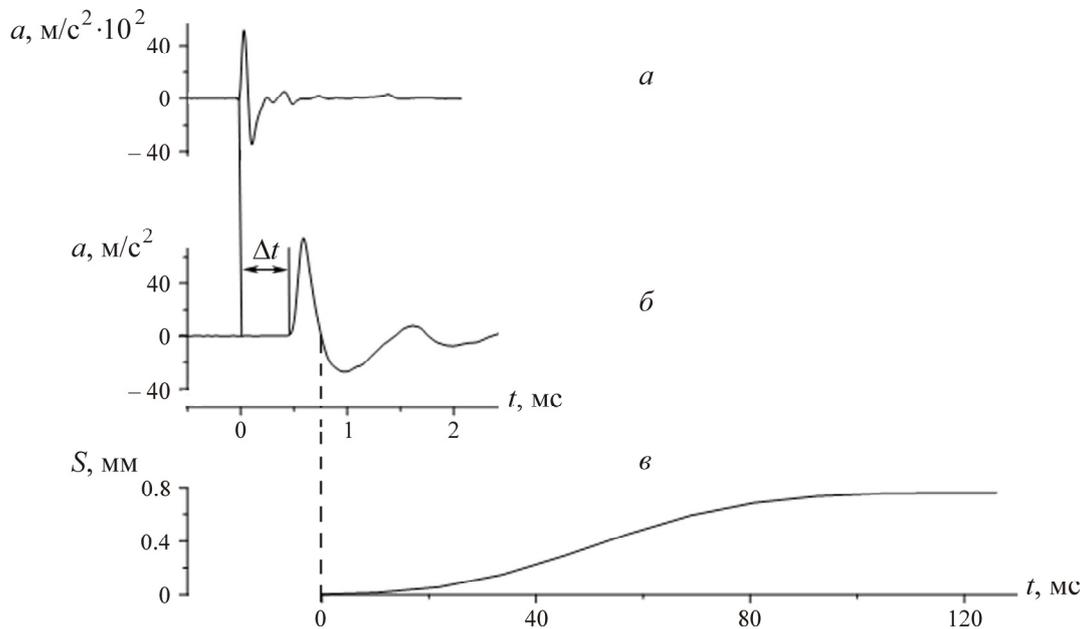


Рис. 7. Временное сопоставление импульса триггера с импульсом на пластине и смещением пластины: а — импульс триггера; б — форма импульса после прохождения его через сыпучую среду на поверхность пластины; в — смещение пластины

В качестве примера на рис. 8 представлены формы импульсов на поверхности пластины при внешней пригрузке свободной поверхности образца $p = 46.8$ кПа для трех значений энергии удара U , $\text{Дж} \cdot 10^{-3}$: 4.55 (1); 1.40 (2); 0.175 (3). Видно, что с уменьшением энергии удара увеличивается время прохождения (задержка) волны через сыпучую среду. Амплитуда импульсов

на пластине изменяется пропорционально импульсу триггера; отмечено также ее возрастание при увеличении внешнего давления. Отношение амплитуды волны сжатия к амплитуде волны разгрузки для всех опытов лежит в диапазоне 2.1 – 2.4.

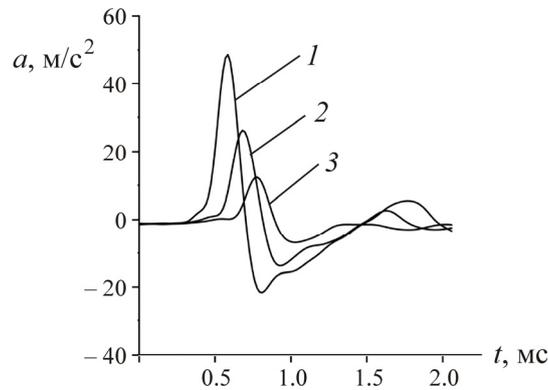


Рис. 8. Формы импульсов на пластине при разных энергиях удара

Рассмотрим снова рис. 7, из которого видно, что момент времени начала смещения пластины совпадает с началом действия волны разгрузки. Этот момент времени на рис. 7 отмечен штриховой линией. Причиной подвижки явилось уменьшение нормального давления на пластине, при котором отношение сдвигающей и нормальной нагрузок становится больше критического, равного статическому коэффициенту трения покоя. После затухания волны дальнейшее движение пластины определяется такими факторами, как структурное изменение среды, ее реакция, инерционность системы и запас упругой энергии. Условия остановки пластины обусловлены в основном величиной частично израсходованной на преодоление трения упругой энергии и положительной дилатансией материала, которая, возрастая в процессе движения, приводит к увеличению нормального давления, сдерживанию движения и возвращению в состояние покоя. Повторное возмущение от триггера приводит к возникновению следующего скачка смещения, но уже меньшей амплитуды и т. д.

Таким образом, кратковременное воздействие на контакт волны разгрузки приводит к независимому длительному (на два порядка большему) времени движения пластины и разрядке упругой энергии пружины, что отличает рассматриваемый процесс от релаксации напряжений.

Характер изменения реакции среды при движении пластины можно оценить с помощью модели осциллятора с сухим трением (рис. 9). В начальный момент времени пластина на подложке находится в состоянии покоя под действием двух противоположно направленных сил — силы сжатой пружины, создающей касательные усилия T_0 , и силы реакции среды R , которая определяется в основном трением, имитирующим сыпучую среду. Условия покоя могут соблюдаться как в режиме предельного состояния, когда $T_0 = R^*$, так и в допредельном состоянии, когда $T_0 < R^*$, где R^* — предельное сопротивление среды. На рис. 2 первому режиму соответствует исходная точка a , которая лежит на диаграмме предельного состояния при максимальной сжатии пружины; другие точки соответствуют устойчивому режиму, поскольку при каждом триггере пружина частично разгружается.

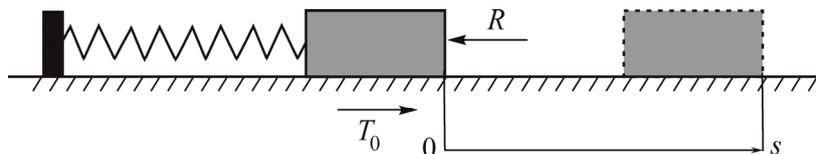


Рис. 9. Схема взаимодействия элементов модели

Рассмотрим первый скачок смещений из предельного состояния $T_0 = R^*$. Под воздействием отрицательной волны разгрузки триггера реакция среды R уменьшается и пластина приходит в движение по закону

$$R(S) = T_0 - WS - m\ddot{S},$$

где $S = S(t)$ — смещение; \ddot{S} — ускорение; m — масса; W — жесткость пружины.

Зависимость $S = S(t)$ бралась из эксперимента (см. рис. 7), которому соответствовала пригрузка $p = 46.8$ кПа, энергия удара триггера $U = 3.5 \cdot 10^{-3}$ Дж, жесткость пружины $W = 1.61$ кН/м и масса пластины $m = 0.17$ кг. После подстановки $S(t)$ в правую часть формулы определялась зависимость $R = R(t)$, затем исключением t как параметра определялась функция $R = R(S)$. График этой зависимости представлен на рис. 10 сплошной линией, штриховая линия соответствует разгрузке пружины.

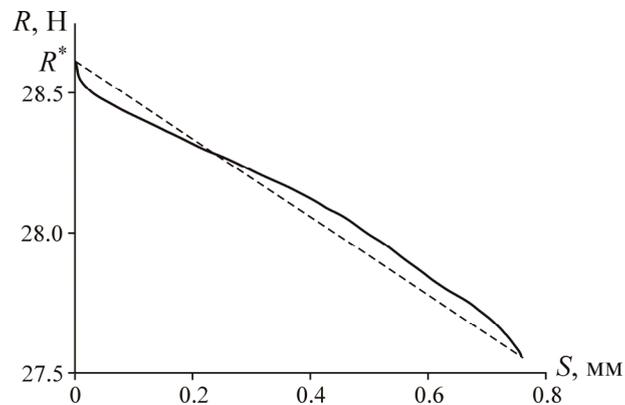


Рис. 10. Реакция среды в зависимости от смещения пластины

Разность ординат этих функций показывает, что после воздействия триггера в точке R^* сила пружины до точки пересечения кривых превосходит сопротивление среды, что соответствует разгону пластины. После точки пересечения ситуация меняется на противоположную: дальнейшее движение сопряжено с торможением пластины до полной ее остановки за счет превосходства сил трения над силой сжатой пружины. Для инициирования следующего скачка смещений необходимо произвести повторное возмущение среды триггерной разгрузкой. В природе возникшая скачкообразная подвижка генерирует сейсмические волны, которые, распространяясь на большие расстояния, становятся причиной разрушительных последствий.

ВЫВОДЫ

Показана возможность моделирования разлома горного массива с помощью слоя сыпучего материала, заключенного между жесткими шероховатыми пластинами.

Триггерное воздействие на напряженную сыпучую среду вызывает скачок смещений и частичный сброс напряжений.

Смещение берегов разлома инициируется волной разгрузки от триггера и приводит к длительному (на два порядка большему) времени движения берегов по сравнению с временем действия возмущающего импульса.

При мягком нагружении по сравнению с жестким возрастает энергоемкость деформационного накопления упругой энергии среды и ее разрядка при триггерном воздействии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бобряков А. П., Лубягин А. В.** Экспериментальное исследование неустойчивых режимов скольжения // ФТПРПИ. — 2008. — № 4.
2. **Косых В. П.** Закономерности распределения скачков смещений при срезе сыпучих материалов в стесненных условиях // ФТПРПИ. — 2010. — № 3.
3. **Aksenov V. V., Lavrikov S. V., Revuzhenko A. F.** Numerical modeling of deformation processes in rock pillars, *Applied Mechanics and Materials*, 2014, Vol. 682.
4. **Клишин С. В., Микенина О. А.** О коэффициенте бокового распора случайных упаковок дискретных элементов // ФТПРПИ. — 2013. — № 6.
5. **Триггерные эффекты** в геосистемах: материалы Всерос. семинара-совещ., 22–24 июня 2010 г. / под ред. акад. РАН В. В. Адушкина, проф. Г. Г. Кочаряна. — М.: Геос, 2010.
6. **Молчанов А. Е.** Механика триггерного воздействия при искусственном провоцировании землетрясения // Триггерные эффекты в геосистемах: материалы Всерос. семинара-совещ., 22–24 июня 2010 г. / под ред. акад. РАН В. В. Адушкина, проф. Г. Г. Кочаряна. — М.: Геос, 2010.
7. **Бобряков А. П., Ревуженко А. Ф., Шемякин Е. И.** Однородный сдвиг сыпучего материала. Локализация деформаций // ФТПРПИ. — 1983. — № 5.
8. **Бобряков А. П., Ревуженко А. Ф.** Однородный сдвиг сыпучего материала. Дилатансия // ФТПРПИ. — 1982. — № 5.
9. **Бобряков А. П.** Влияние слабых сотрясений на статически напряженный массив сыпучей среды // ФТПРПИ. — 2008. — № 2.
10. **Кочарян Г. Г., Бенедик А. А., Костюченко В. Н., Кулюкин А. М., Павлов Д. В.** Создание геомеханических моделей геофизических объектов // Физические процессы в геосферах при сильных возмущениях. — М.: ИДГ РАН, 1996.
11. **Esaki N., Du S., Metani Y., Ikusada K., and Jing Li.** Development of a shear flow test apparatus and determination of coupled properties for a single rock joint, *Int. J. Rock Mech, Min. Sci.*, 1999, Vol. 36.
12. **Кочарян Г. Г., Марков В. К., Остапчук А. А., Павлов Д. В.** Мезомеханика сопротивления сдвигу по трещине с заполнителем // Физ. мезомеханика. — 2013. — Т. 16. — № 5.
13. **Кочарян Г. Г., Спивак А. А.** Динамика деформирования блочных массивов горных пород. — М.: ИКЦ “Академкнига”, 2003.
14. **Баренблатт Г. И.** Великий механик Сергей Алексеевич Христианович // Сергей Алексеевич Христианович: Выдающийся механик XX века / отв. ред. В. Н. Фомин, А. М. Харитонов. — Новосибирск: Гео, 2008.

Поступила в редакцию 8/XI 2014