

УДК 624.131.21+539.37

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРИГГЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ
В РАЗЛОМНЫХ ЗОНАХ ГОРНЫХ ПОРОД**

А. П. Бобряков

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

Работа выполнена в рамках лабораторного моделирования неустойчивого деформирования горных пород вдоль границы разломной зоны. Приведены результаты исследований подвижек по жестким границам, разделенным прослойкой предварительно напряженной сыпучей среды при триггерной разгрузке. Установлено, что связь между сбросом усилий и смещениями твердых границ на диаграммах триггерной разгрузки линейна. Угол наклона прямых характеризует результирующую жесткость системы и определяется вариацией входящих параметров: пружины, имитирующей упругость бортов разлома; сыпучей среды, имитирующей контактное трение на разломе; триггера, вызывающего кратковременное падение трения. Выявлено, что мягкое нагружение более энергоемко, а при разгрузке приводит к меньшим сбросам усилий, но к большим подвижкам. Показано, что разгрузка сыпучей среды, приведенной в предельное состояние, при каждом триггерном воздействии сопровождается динамическими проявлениями в виде “скачков” смещений твердых границ и частичным сбросом сдвиговых усилий.

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

В естественных условиях, когда в земной коре возникают напряжения, при достижении ими предельно возможных значений происходит разрядка. Последняя может быть “мгновенной” за счет разрыва горных пород либо медленной за счет ускоряющегося движения бортов уже существующего разлома. В любом случае подготовка землетрясений, происходящих в природе, может занимать достаточно большие временные интервалы и приводить к разрушительным последствиям.

Проведенные в лаборатории модельные эксперименты на приборах прямого среза [1, 2] показали, что относительное движение сыпучей среды при мягком равномерном нагружении за счет разрядки становится неустойчивым и прерывистым.

Если в сейсмически опасной зоне в результате деятельности человека на статически напряженный сдвигом массив периодически накладываются различного рода сотрясения от взрывов, вибраций и т. п., то могут отмечаться более слабые и ранние по времени, но чаще повторяющиеся в сравнении с природными техногенные землетрясения. Преждевременное провоцирование землетрясений в этом случае осуществляется триггерным эффектом, при котором

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

малые возмущения в геосреде вызывают разрядку напряжений. Важность изучения триггерных процессов позволила выделить эту проблему в отдельную тематику; первый семинар-совещание “Триггерные процессы в геосистемах” прошел в Институте динамики геосфер РАН в 2010 г. [3].

Одним из возможных триггерных воздействий на тектонические разломы является уменьшение трения между бортами. Здесь мы не ставим целью подробно рассмотреть техническую реализацию всех видов воздействий, а только отметим четыре основных способа: 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 [4]. В нашем исследовании использовано воздействие слабой сейсмической волны как наиболее доступной и удобной при дистанционной разгрузке концентрации упругой энергии за счет уменьшения трения внутри сыпучей среды.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

Обычно при моделировании подобных процессов используется прослойка зернистого материала, помещенного между двумя относительно сдвигающимися жесткими пластинами (пластинами, см., например, [5]). В данной работе используется схема двухсекционного нагружения (с тремя пластинами), в которой центральная подвижная пластина находится симметрично между двумя неподвижными [6, 7]. Вертикальное и симметричное расположение позволило уравновесить горизонтальные нормальные напряжения, возникающие по обе стороны от пластины, не применяя буферного устройства, и сохранить при деформировании неизменным расстояние между ними. Отметим, что рассмотренные варианты схем нагружения (с двумя или тремя пластинами) по своим функциональным возможностям идентичны с той лишь разницей, что касательные напряжения на поверхности подвижной пластины при двухсекционном нагружении удваиваются.

На рис. 1 приведена схема нагружения и общий вид устройства. Металлическая подвижная пластина 1, погруженная в сыпучий материал, под действием сдвигаемых усилий T , создаваемых винтом через пружину 2, может горизонтально смещаться по направлению Ox на величину S относительно двух других неподвижных пластин 3. Введение в схему нагружения пружин разной жесткости (мягкое нагружение) имитирует упругость бортов разлома при их контактном сдвиговом взаимодействии. В устройстве имеется возможность изменения ширины зоны разлома за счет дискретного изменения расстояния L между пластинами. В качестве неподвижных пластин использовались также и боковые стенки камеры 4 для сыпучего материала (рис. 1б), как наиболее удаленные от подвижной пластины 1. В качестве триггерного устройства использован сейсмоисточник 7 в виде физического маятника, выполненного из жесткого стержня, на конце которого закреплен стальной шарик диаметром 18 мм. Длина маятника 300 мм, масса шарика 35 г. Одиночный удар наносился по боковой стенке камеры 4 на уровне центра ширины пластины, его энергия задавалась углом отклонения от положения равновесия.

Напряжение обжатия подвижной пластины нормальным горизонтальным давлением σ измерялось “плавающим” датчиком 5, установленным в сыпучей среде на исследуемом расстоянии от пластины. Касательные усилия T (напряжения τ) на подвижной пластине 1 определялись датчиком 6, закрепленным на ее торце. При измерении использовался метод тензометрии. Электрические сигналы с датчиков T и σ усиливались и подавались на графопостроители. Производилась запись этих параметров в зависимости от смещений подвижной пластины S либо с разверткой по времени при исследовании динамики процесса. Величина смещений также измерялась с помощью тензометрии.

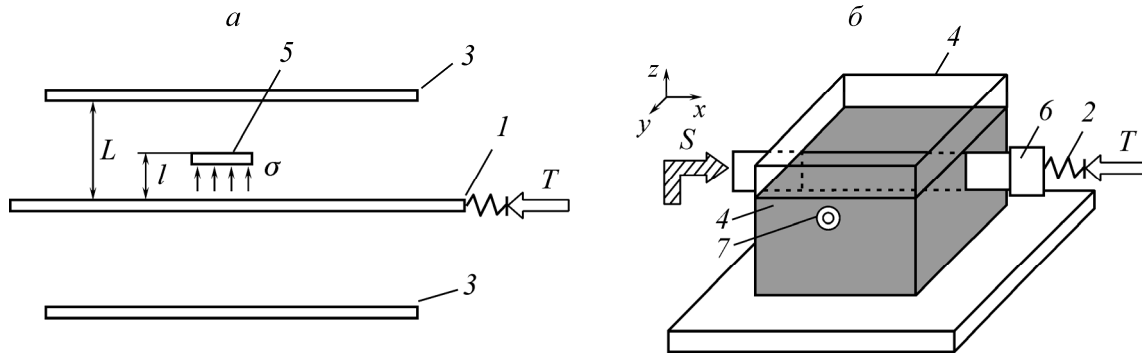


Рис. 1. Экспериментальный стенд: а — схема нагружения (вид сверху); б — общий вид устройства

ПОДГОТОВКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ И ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Подготовка образцов проходила в два этапа.

1. Эксперименты показывают, что в сыпучем материале за счет содержания в нем пор, хаотически распределенных по объему, всегда имеет место разброс механических свойств. Поэтому материал перед опытом всегда приводился в одинаковое состояние. В [8, 9] показано, что улучшение однородности структуры и стабилизации механических параметров среды можно достичь, если ее предварительно деформировать знакопеременными сдвигами на малых амплитудах, которые, снимая трение на контактах частиц, эффективно разрушают дефекты, уплотняют среду и не вызывают при этом локализации сдвигов. В экспериментах амплитуда медленного качания пластины составляла 1.5 мм, число циклов деформирования равнялось 50.

2. Триггерное воздействие всегда имеет малую величину, поэтому состояние объекта (сыпучего образца), где может проявиться эффект, 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. Установлено, что песок, сначала деформированный на малых циклических амплитудах, при первом смещении пластины проявляет максимальную скорость дилатансии со знаком плюс (увеличение объема), повышенную по сравнению с рыхлой упаковкой, предельную прочность и минимальный разброс результатов при повторном проведении опытов.

На рис. 2 приведены диаграммы касательного усилия T и горизонтального обжатия пластины σ при нагружении с последующей триггерной разгрузкой. Видно, что первое смещение пластины, создаваемое винтом через пружину (мягкое нагружение), вызывает рост усилий и напряжений, которые затем плавно приближаются к предельным значениям. Точка a на диаграммах соответствует окончанию нагружения, фиксации положения винта при максимальном сжатии пружины и началу триггерной разгрузки.

Под воздействием на сыпучую среду каждого одиночного импульса от сейсмоисточника возникает “скачок” смещений пластины из одного состояния равновесия в другое, что соответствует скачкообразному изменению местоположения пера самописца на диаграмме из точки a в точку b , где новый уровень касательного усилия T отмечен штрихом bc . При следующем триггерном воздействии от исходной точки c происходит скачкообразный переход в точку d и т. д.

Таким образом, процесс разгрузки под воздействием серии слабых ударов на сыпучую среду сопровождается динамическими проявлениями в виде “скачков” смещений пластины ΔS с частичным сбросом накопленных на ней усилий ΔT . Под действием серии ударов с одинаковыми уровнями энергий процесс имеет затухающий характер (см. рис. 2).

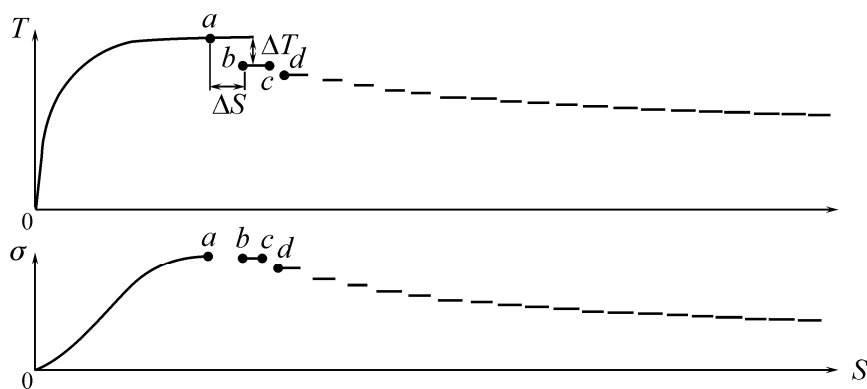


Рис. 2. Диаграммы касательного усилия T и горизонтального обжатия пластины σ в зависимости от смещений S при нагружении (сплошные линии) и триггерной разгрузке (штриховые)

Рассмотрим еще одно представление исходных данных, где полученное состояние системы в результате каждого триггерного воздействия отображается на плоскости листа точкой при кратковременном контакте с пером самописца. На рис. 3 в масштабе показан вид диаграммы касательных усилий на пластине T при ее смещении S до предельной величины (сплошные линии) и последующей триггерной точечной разгрузки. 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 $p = 23.4$ Па.

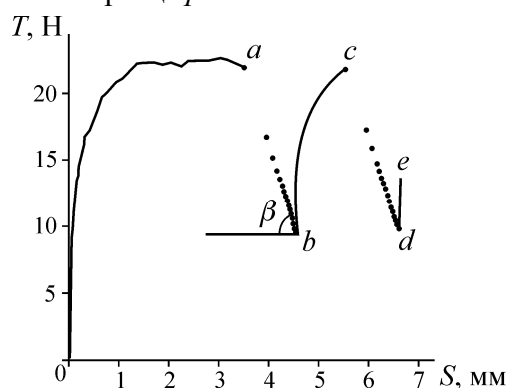


Рис. 3. Вид диаграмм нагружения – разгрузки при триггерном воздействии

Как и прежде, исходная точка a лежит на участке диаграммы предельного состояния и соответствует максимальному сжатию пружины, ab — участок разгрузки, состоящий из 20 ступеней одинаковых триггерных воздействий, bc — повторное догружение винтом до предельного состояния, cd — повторная разгрузка и de — окончание диаграммы.

Из эксперимента следует: диаграмма нагружения имеет свойства обратимости (точка a может быть заменена на точку c); точечная разгрузка (первая и повторная) аппроксимируется прямыми с одинаковым наклоном β , $\operatorname{tg}\beta = W^*$ характеризует жесткость всей системы и может быть определен по разгрузочной ветви диаграммы без дополнительных вычислений.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Известно, что процесс деформирования блочной структуры зависит от касательной и нормальной составляющей жесткостей контакта, характеризующих связь между напряжениями и деформациями [10, 11]. Полученное в экспериментах постоянство значений в отношениях при-

ращений усилий ΔT и смещений пластины ΔS на диаграмме триггерной разгрузки означает, что процесс развивается при постоянной результирующей жесткости всей системы W^* , которая включает в себя жесткость нагружающего элемента (пружину) W , сдвиговую жесткость материала, контактирующего с пластиной, где главным является трение, а также величину уменьшения трения песка под активным воздействием сейсмической волны от триггера. Подобный эффект низкого трения возникает также при импульсном воздействии на контакты блочной среды [12].

Отметим, что линейность диаграмм подтверждалась во всех опытах с разными вариациями входных параметров — пригрузок p , энергий удара U и жесткостей пружин W .

На параметры деформирования сыпучей среды большое влияние оказывает степень стеснения деформаций, когда вследствие тех или иных граничных условий подвергаемый сдвиговым деформациям сыпучий материал в какой-то степени не имеет возможности увеличивать объем. За счет подавляемой дилатансии при дальнейшем деформировании резко возрастают жесткость контактов и напряжения.

В экспериментах использовалась дополнительная пригрузка p свободной поверхности образца, которая имитировала глубину налегающего слоя. На рис. 4 приведены значения предельных (максимальных) касательных усилий T и напряжений τ на пластине, полученные из диаграмм нагружения в зависимости от распределенного давления p на поверхности образца.

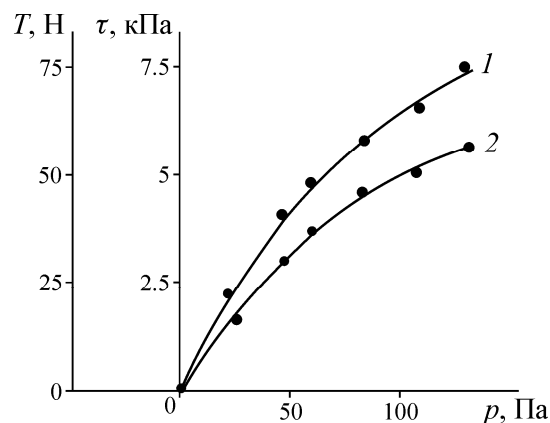


Рис. 4. Предельные касательные усилия T (1) и напряжения τ (2) на участке в зависимости от пригрузки p

Влияние пригрузок на вид диаграммы деформирования иллюстрирует рис. 5. Здесь, как и прежде, показаны касательные усилия T в зависимости от смещений пластины S на двух стадиях деформирования — нагружение до предельного состояния (сплошные линии) и точечная триггерная разгрузка под воздействием в каждом опыте 20 одиночных слабых ударов с постоянной энергией $U = 4.55 \cdot 10^{-3}$ Дж и жесткостью пружины $W = 9$ кН/м. Величина вертикальных пригрузок на поверхности образца варьировала более чем в 5 раз и составляла следующие значения, Па: 1 — 23.4; 2 — 46.8; 3 — 60.8; 4 — 84.4; 5 — 107.4; 6 — 131.

На рис. 5 точки диаграмм разгрузки во всех опытах снова образуют прямые линии с одинаковым углом наклона. Изменение пригрузки не влияет на величину результирующей жесткости системы $W^* = \Delta T / \Delta S = \operatorname{tg} \beta = \operatorname{const}$, т. е. параметры трения с учетом триггерного эффекта остаются постоянными. С увеличением пригрузки увеличивается длина участка разгрузки.

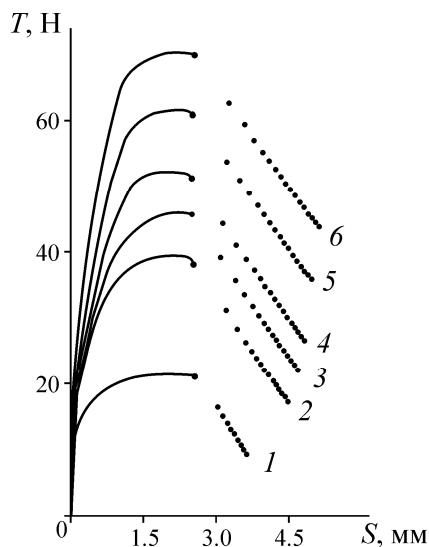


Рис. 5. Касательные усилия T в зависимости от смещений пластины S при разных пригрузках p

Далее исследовалось влияние энергии триггерных внешних воздействий (амплитуды импульсов) на диаграммы разгрузки. В большинстве случаев, как уже отмечалось, среди различных спусковых механизмов силового воздействия решающим фактором является изменение нормального давления на контактах, в результате которого отношение τ/σ может стать критическим, равным коэффициенту трения среды. Очевидно, что провоцирование по типу изменения трения должно быть зависимым от длительности воздействия, амплитуды и темпа перегрузки [4]. Эксперименты показывают, что время импульсного воздействия составляет примерно 0.05 с и слабо зависит от предударной скорости инерционной массы маятника. Это согласуется с [13], где время соударения массивного тела и несоизмеримо легкого бойка сферической формы имеет зависимость

$$\tau = A \cdot V_0^{-0.2},$$

где V_0 — предударная скорость бойка; A — коэффициент, зависящий от массы соударяемых тел, их радиусов кривизны и модулей упругости (плоская стенка камеры, воспринимающая удар, представляется как сферическая поверхность с бесконечно большим радиусом). В любом случае волна напряжений, создаваемых микросейсмическим воздействием, должна быть достаточной, чтобы вызвать разрядку накопленной энергии. В противном случае триггер не срабатывает, а такие воздействия являются причиной подготовки события.

На рис. 6 приведены диаграммы касательных усилий, возникающих в процессе нагружения пластины до критического состояния и точечной разгрузки под действием серии из 20 одиночных ударов трех значений энергий U , Дж·10⁻³: a — 0.175, b — 1.4, c — 4.55. Остальные параметры постоянны и равны: жесткость пружины $W = 9$ кН/м, пригрузка на поверхности образца $p = 60.8$ Па.

Из рисунка видно, что триггерное воздействие с меньшей энергией (a) по сравнению с большей (c) отличается большим углом наклона ($\operatorname{tg}\beta = 2.17$ и 1.51 соответственно) и меньшей длиной разгрузочных диаграмм. В этих экспериментах отношение энергий импульсных воздействий равно 26, отношение величин сброса усилий ΔT после первого импульса — 6, отношение высвободившейся упругой энергии в результате триггерной разрядки — 12 (энергия пропорциональна заштрихованной площади под участками разгрузочных диаграмм).

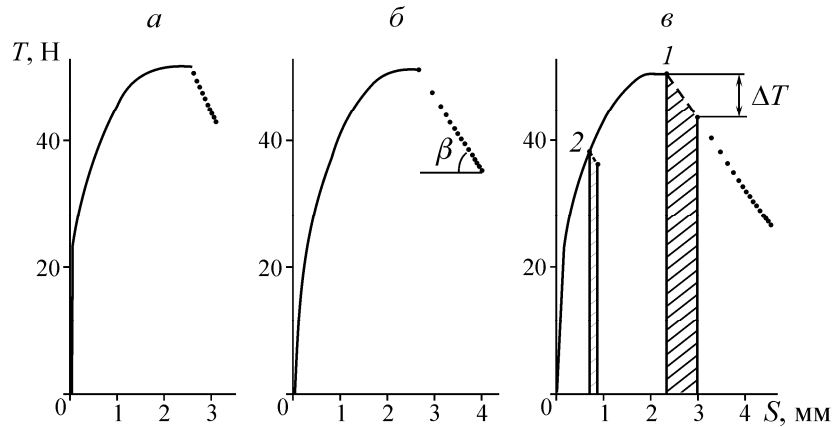


Рис. 6. Диаграммы нагружения и триггерной разгрузки при трех значениях уровней энергии слабых возмущений

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 присутствует. Вывод подтверждается графиками рис. 7, где показано влияние энергии возмущений U на результирующую жесткость системы W^* . Приведенные графики получены при четырех значениях жесткостей пружин W , кН/м: 1 — 1.61; 2 — 3.64; 3 — 5.54; 4 — 9.0. В экспериментах использовалось шесть значений калиброванных импульсов с уровнями энергий $U \cdot 10^{-3}$ Дж: 0.175; 0.35; 1.4; 2.45; 3.5; 4.55.

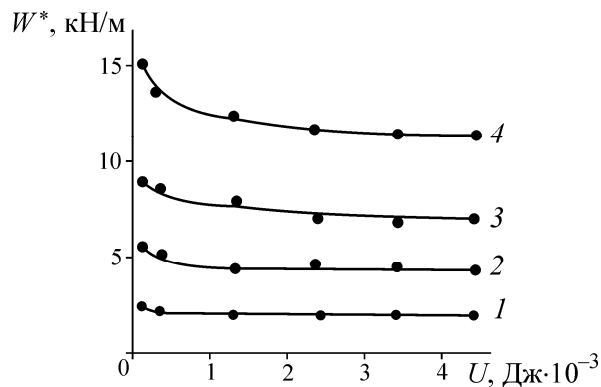


Рис. 7. Результирующая сдвиговая жесткость в зависимости от энергии внешних воздействий

Как следует из рис. 7, каждой жесткости пружины соответствует свой уровень жесткости системы. На графиках в области слабых энергий видно резкое увеличение W^* , которое с возрастанием энергии уменьшается и выполаживается.

Таким образом, на каждом графике влияние энергии возмущения на параметры трения среды при триггерном эффекте можно характеризовать некоторым максимальным значением трения, близким к статическому, и низким при более сильном воздействии, приводящем материал в режим, когда дальнейшее увеличение энергии не вызывает изменения трения.

Вернемся к рис. 6 и попробуем триггером разгрузить систему заранее, когда недогруженная до предельного состояния 1 сыпучая среда разгружается на возрастающей ветви диаграммы в точке 2. Эта диаграмма получена в отдельном опыте и затем наложена на предельную кривую деформирования. Видно, что высвободившаяся упругая энергия в недогруженном состоянии (точка 2) меньше в случае неустойчивого перегруженного состояния (точка 1).

В естественных условиях процесс накопления упругой энергии может занимать несколько десятков, а то и сотен лет, но в любом случае процесс закончится достижением предельно возможных значений напряжений и их разрядкой, приводящей к катастрофическим последствиям. По поводу запоздалых землетрясений уместно привести следующее высказывание [14]: “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?”

Как видно из рис. 6в, ранняя разрядка энергии опережающим триггерным воздействием позволяет уменьшить величину высвобождаемой упругой энергии по сравнению с запоздалым критическим состоянием среды приблизительно в 5.5 раз.

Далее на рис. 8 приведены предельные диаграммы, в которых разгрузка осуществлялась триггерным воздействием с постоянной энергией ударов $U = 2.45 \cdot 10^{-3}$ Дж при трех значениях жесткостей пружин W , кН/м: *a* — 1.61, *б* — 4.5, *в* — 9 и постоянной пригрузкой образца $p = 23.4$ Па.

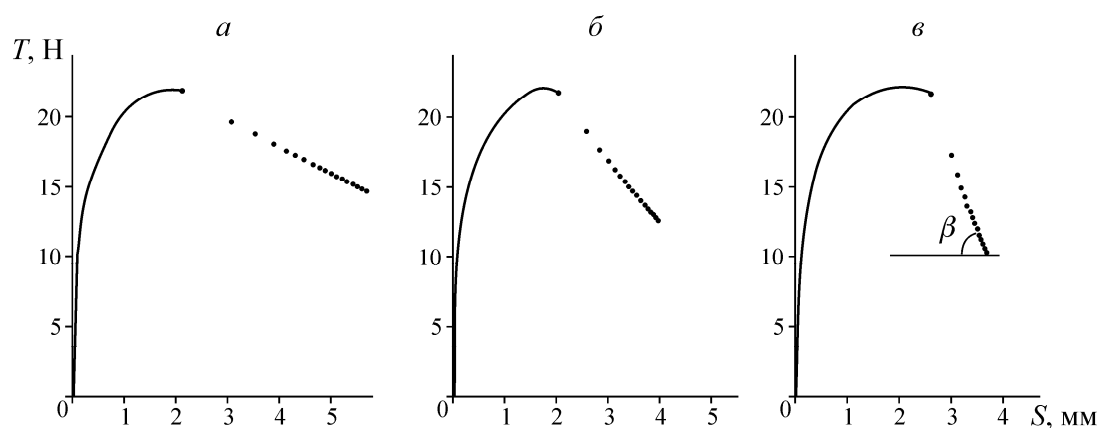


Рис. 8. Предельные диаграммы деформирования с разгрузкой при трех значениях жесткостей пружин

На рис. 8а, б видно, что большая жесткость пружины приводит к возрастанию угла наклона разгрузочных диаграмм β , т. е. к увеличению результирующей жесткости системы W^* . 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. 8а в 4 раза превосходит энергию разрядки рис. 8в, хотя разгрузка в первом случае оказалась менее глубокой. Таким образом, схема с параметрами рис. 8а является более энергоемкой, поскольку величина запасаемой ею упругой энергии E на этапе нагружения пружин, имеющих разную жесткость, но сжатых до одинаковой предельной величины силы T , значительно больше и определяется отношением

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{W_2}{W_1}.$$

Для данного конкретного случая это отношение равно 5.5.

В естественных условиях в разломной зоне критическая плотность энергии пропорциональна квадрату касательных напряжений τ :

$$E = \frac{\tau^2}{2G},$$

где G — усредненное значение модуля сдвига взаимодействующих горных пород разломной зоны.

Таким образом, как и в модели, в скальной породе при одинаковых параметрах трения и меньшем модуле сдвига (более мягкое нагружение) по достижении постоянного предельного значения τ будет накапливаться больше энергии, которая, высвобождаясь из зоны, расположенной по обе стороны от разлома, обеспечит соответственно большую динамическую подвижку. Возникшая скачкообразная деформация генерирует сейсмические волны, которые, распространяясь на большие расстояния, становятся причиной разрушительных последствий.

В заключение рассмотрим рис. 9, где показана результирующая сдвиговая жесткость W^* , вычисленная по диаграммам точечной разгрузки пластины в зависимости от жесткости используемых пружин W . Графики получены при триггерных воздействиях двух уровней энергии U , Дж: $0.175 \cdot 10^{-3}$ (1) и $4.55 \cdot 10^{-3}$ (2); пригрузка на поверхности образца постоянна и равна $p = 23.4$ Па.

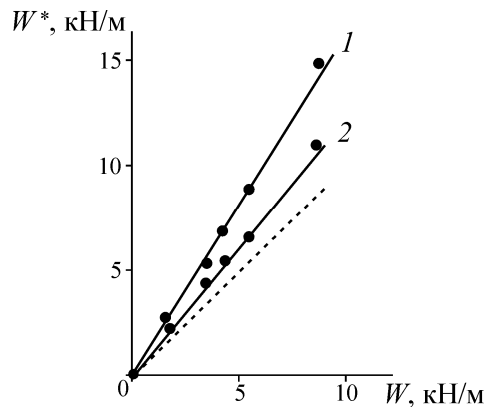


Рис. 9. Результирующая сдвиговая жесткость в зависимости от жесткости пружин при двух уровнях энергии триггерных воздействий

Видно, что возрастание жесткости пружины приводит к линейному росту жесткости всей системы. Если бы результирующая жесткость определялась только жесткостью пружины ($W^* = W$), ее отображение соответствовало бы пунктирной линии под углом $\pi/4$. Однако графики 1 и 2 проходят выше, поскольку они отражают влияние дополнительной жесткости, связанной с трением на контактных поверхностях скольжения. Разность ординат графиков 1 и 2 показывает эффективность триггерного воздействия на сыпучую среду. Уменьшение уровня энергии внешнего воздействия приводит к менее эффективному снижению трения и соответственно к увеличению результирующей жесткости системы.

ВЫВОДЫ

В рамках моделирования неустойчивого скольжения горных пород вдоль разломной зоны разработан стенд, в котором относительное смещение твердых границ, разделенных прослойкой сыпучей среды, провоцируется триггерным воздействием с помощью сейсмической волны.

Процесс точечной разгрузки сыпучей среды, приведенной в предельное состояние, сопровождается динамическими проявлениями в виде “скачков” смещений твердых границ и частичным сбросом сдвиговых усилий.

Экспериментально установлено, что связь между сбросом усилий и смещениями на диаграммах разгрузки линейна, но угол наклона прямых, характеризующий жесткость системы, зависит от вариаций входящих параметров: жесткости пружины, имитирующей упругость бортов разлома; сдвиговой жесткости сыпучей среды, имитирующей силы контактного трения; триггерного эффекта, вызывающего кратковременное падение трения при воздействии сейсмической волны.

Результирующая жесткость системы не зависит от величины внешних пригрузок. Мягкое нагружение увеличивает энергоемкость процесса, а при разгрузке приводит к меньшим сбросам усилий и к большим скачкам смещений.

Показана возможность ранней разрядки упругой энергии массива опережающим триггерным воздействием с целью предотвращения катастрофических последствий.

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. **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.
4. **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.
5. **Герасимов Т. И., Кондратьев В. Н., Кочарян Г. Г.** Модельные исследования особенностей сдвигового деформирования трещин, содержащих заполнитель // ФТПРПИ. — 1995. — № 4.
6. **Johnson P., Savage H., Knuth M., Gombert J., Marone C.** Effects of acoustic waves on stick-slip in granular media and implications for earthquakes, *Nature*, 2008, Vol. 451.
7. **Бобряков А. П., Лубягин А. В.** Модельные исследования поведения деформированной блочной геосреды при подготовке землетрясений // ФТПРПИ. — 2011. — № 6.
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. **N. Esaki, S. Du, Y. Metani, K. Ikusada, Li. Jing** 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. **Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И.** Об эффекте аномально низкого трения в блочных средах // ФТПРПИ. — 1997. — № 1.
13. **Пономарев С. Д., Бидерман В. А. и др.** Основы современных методов расчета на прочность в машиностроении. — М.: Машгиз, 1952.
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 21/X 2013