

УДК 624.131.21 + 539.37 + 66.067.1

**МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРИГГЕРНОГО ЭФФЕКТА
НА РАЗЛОМАХ ГОРНЫХ ПОРОД**

А. П. Бобряков

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

Рассмотрены три фактора, влияющие на результаты физического моделирования неустойчивых динамических подвижек вдоль берегов разлома при триггерной разгрузке. В качестве заполнителя разлома используется прослойка кварцевого песка между движущимися жесткими шероховатыми пластинами, в которой изменяется его степень уплотнения, релаксация напряжений и скачок фильтрационного воздушного потока через прослойку, моделирующего прорыв газа через разлом. Определены периоды релаксации плотной упаковки песка под влиянием фильтрующегося через него газа.

Срез, сыпучая среда, триггерный эффект, мягкое нагружение, разлом, трение скольжения, фильтрация газа

DOI: 10.15372/FTPRPI20190606

Широкий спектр проблем механики деформируемых твердых тел и горных пород рассмотрен в сборнике статей, посвященных 75-летию Е. И. Шемякина [1]. Одна из важных проблем напряженного горного массива — проявление динамических эффектов на разломах горных пород, вызванных сейсмическими волнами от взрывов [2]. В естественных условиях, когда в земной коре возникают напряжения, при достижении ими предельно возможных значений происходит разрыв. Однако более ранние по времени, но чаще повторяющиеся в сравнении с природными отмечаются техногенные землетрясения. Одним из возможных преждевременных провоцирующих землетрясений является триггерный эффект от сейсмозрывной волны в процессе горного производства.

Во многих местах земной коры имеются разрывы, берега которых образуют вложенную структуру. Смещающиеся поверхности трещины образуют контактные концентраторы напряжений, деформации в которых на несколько порядков превышают деформации самих берегов. В местах контактов горные породы разрушаются, поэтому взаимодействие берегов разломов после разрушения происходит через слой обломочного, раздробленного и переизмельченного материала, напоминающего сыпучую среду [3]. Смещение по разлому протекает в несколько этапов. Вызывающие их тектонические силы действуют в течение долгого времени. Действия

могут быть прерваны, а затем вновь возобновлены и т. д. Один из возможных механизмов глобальных тектонических движений, приводящих к направленному переносу масс Земли, — периодические приливные деформации [4, 5]. Активным разломом считается тот, в котором накоплена упругая энергия, необходимая для преодоления трения между берегами разлома при триггерном воздействии [6, 7]. Если породы по обе стороны от разлома недостаточно жесткие, это условие выполниться не может из-за неспособности достаточного энергонакопления.

В настоящей работе рассматривается моделирование активных разломов под воздействием фильтрации воздушного потока. Истечение сыпучих материалов при одновременном действии на них встречного или попутного газового потока, вызываемого перепадом давления между верхним и нижним уровнями слоя материала, используется в различных технологических аппаратах. Сюда относятся процессы выпуска, перетекания, сушки, а также активизации химических реакций гранулированных материалов под влиянием фильтрующихся через них газов и т. д. [8–11].

В естественных условиях эманация газа происходит за счет просачивания его сквозь зоны трещин и пор. В этом смысле разломы являются особыми участками земной коры, наиболее подверженными воздействию газообразного флюида [12–15]. В [16] приведены модельные исследования неустойчивости подвижек вдоль разлома при воздействии постоянного, не вызывающего самостоятельно триггерного эффекта, а также плавно нарастающего воздушных потоков. В природе наряду с этим существуют процессы накопления, прорыва газа взрывного характера, а также пульсационного выделения метана [17, 18]. Представляет интерес реакция разлома на действие скачка воздушного потока большой длительности и больших амплитуд. Использование в качестве заполнителя кварцевого песка позволило за счет предварительного изменения упаковки частиц приводить модель в соответствие с активным разломом, в котором возможен переход деформационных процессов от квазистационарной стадии накопления к сверхбыстрой катастрофической разрядке упругой энергии [19].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

На рис. 1 приведена схема стенда, конструкция которого с некоторым дополнением прибора приведена в [12]. Металлическая подвижная пластина 1 с упором 8 , погруженная в сыпучий материал, под воздействием усилий T , создаваемых винтом (на рис. 1 не показан) через сменные пружины 2 , жесткостью K может горизонтально смещаться на величину S относительно неподвижных стенок емкости 4 либо установленных неподвижных пластин 3 . Введение в схему нагружения сменных пружин (мягкое нагружение) имитирует упругость бортов разлома при их контактном взаимодействии. В качестве триггерного устройства использовался сейсмоисточник в виде физического маятника, слабый удар от которого наносился по боковой стенке камеры в точке 5 . Разрядка упругой энергии связана с ослаблением сопротивления песка по контактирующим поверхностям. С началом действия отрицательной волны разгрузки на подвижной пластине уменьшается ее боковое обжатие нормальным давлением [20, 21]. В настоящее время широко дискутируется концепция медленных деформационных фронтов в качестве триггеров землетрясений [22–24]. Касательные усилия T на подвижной пластине датчика 7 , как и смещения S , измерялись с помощью тензометрии. Подача воздуха осуществлялась через трубки 6 диаметром 6 мм, перфорированные отверстиями диаметром 2 мм, с шагом через 15 мм. Трубки уложены на дно камеры. Для исключения попадания частиц в отверстия поверхность трубок закрыта тремя слоями нетканого воздухопроницаемого полотна спанбонд.

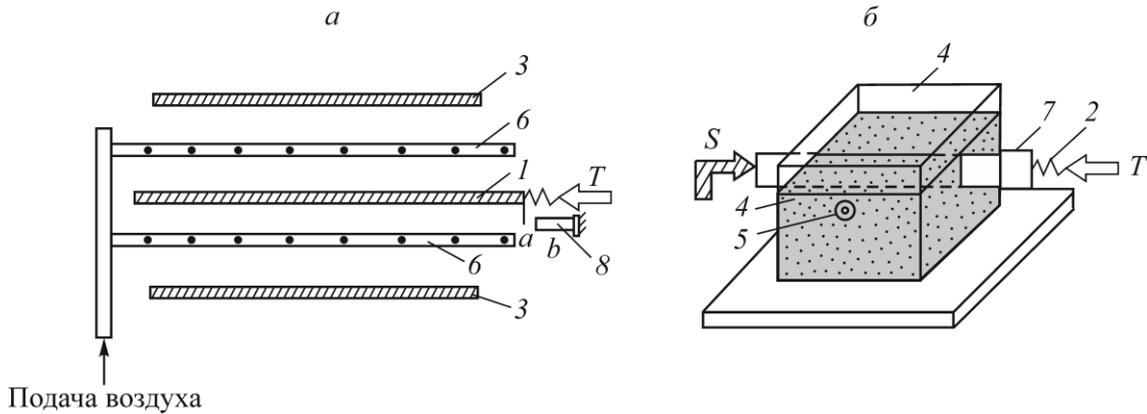


Рис. 1. Экспериментальный стенд: *a* — схема нагружения (вид сверху); *б* — общий вид устройства

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕУПАКОВКИ ЧАСТИЦ НА ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ

Рассмотрим результаты знакопеременных смещений пластины на вид диаграмм деформирования сыпучего материала.

На рис. 2 показано изменение циклических диаграмм деформирования после каждых десяти циклов знакопеременных сдвигов. Точка *a* соответствует выбранному исходному положению пластины, зависящему от жесткости пружины. В этом положении пластина слабо нагружена усилием T_0 сжатой пружины, но за счет внутреннего трения сыпучего материала она находится в состоянии равновесия. Зазор между торцом пластины и упором 8 в точке *b* регулируется подачей микрометрического винта через пружину и составляет в опытах 0.5 – 1.5 мм. Нагружение осуществляется ручным переводом пластины до упора из точки *a* в точку *b* (пружина сжимается), а возвращение ее обратно в сторону исходного положения разгрузки — растягивающей силой сжатой пружины. Движение пластины из одного крайнего положения в другое соответствует одному знакопеременному циклу деформирования.

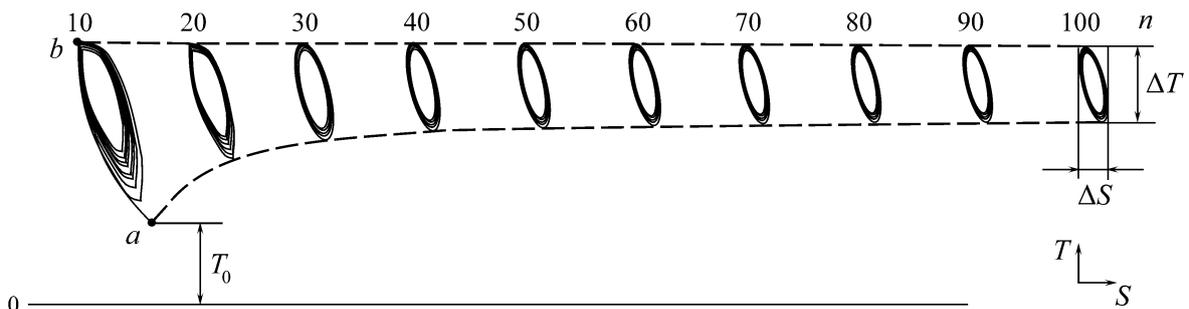


Рис. 2. Изменение диаграмм “нагружение – разгрузка” материала на малых амплитудах после десяти циклов деформирования: точка *a* — исходное положение пластины; точка *b* — точка упора пластины; *n* — число циклов деформирования (жесткость пружины $K = 9.0$ кН/м)

Из диаграмм первых десяти циклов деформирования (рис. 2) видно, что уже после первого цикла пружина не в состоянии вернуть пластину в исходную точку *a*. В результате цикл деформирования становится незамкнутым. Невозвращение в исходное положение возникает за счет частичного разрушения объема пустот в материале, его уплотнения и возрастания силы внутреннего трения при деформировании материала.

Если материал деформируется по неизменной траектории многократно, объемная доля пустот в нем уменьшается, невозвращение к исходной точке a увеличивается, пружина в равновесном состоянии становится более сжатой. Касательные усилия T на пластине возрастают от точки a по траектории штриховой линии огибающей диаграммы нагружений снизу (рис. 2).

Если деформирование рассматривать от цикла к циклу, то при нарастающем их числе диаграммы все меньше начинают различаться между собой и в конце концов повторяются. Диаграммы по сравнению с первыми десятью становятся более компактными. Максимальное уплотнение достигается одновременно с переходом материала в стационарное состояние, характеризующее стабилизацией всех параметров деформирования. Циклические диаграммы при этом замкнуты.

Процесс циклического деформирования и способ его графического представления является процессом сложения двух перпендикулярных колебаний — касательных усилий T и смещений пластины S . Замкнутые траектории, прочерчиваемые точкой, совершающей одновременно два гармонических колебания в двух взаимно перпендикулярных направлениях, впервые изучены французским ученым Ж. А. Лиссажу. Вид фигур Лиссажу зависит от соотношений между периодами, фазами и амплитудами колебаний. В простейшем случае равенства обоих периодов фигуры представляют собой эллипсы. По виду фигур на рис. 2 можно сделать вывод, что стационарное состояние возникло приблизительно после 50 циклов: эллиптические кривые начинают повторяться; огибающая касательных усилий T стабилизируется и выходит на постоянный уровень.

Влияние числа циклов стабилизационного деформирования на склонность материала к динамическим проявлениям оценивалось по результатам испытаний упаковки, полученной нагружением до предельной нагрузки с последующей триггерной разгрузкой [16]. Каждое испытание нарушает упаковку частиц, поэтому материал после испытания выгружался и процесс подготовки к следующему эксперименту повторялся: рыхлая засыпка в камеру, знакопеременные перемещения пластины при другом исследуемом числе циклов деформирования, новое испытание и т. д.

На рис. 3 приведены диаграммы предельного нагружения и триггерной разгрузки при испытании материала после 10, 20 и 60 циклов деформирования. Точка A — предельная нагрузка, AC — триггерная разгрузка под воздействием пяти слабых ударов одинаковых энергий. Сейсмоимпульсы от каждого удара вызывают разгрузку упругой энергии в виде скачков смещений ΔS и сброса усилий ΔT на пластине. Характерная особенность триггерного эффекта — быстрый переход системы из одного равновесного состояния в другое. Новое состояние равновесия достигается скачком. Время перехода составляет ~ 0.1 с. С увеличением порядкового номера триггера наблюдается быстрый спад энерговыделения вплоть до полного затухания. Результаты триггерной разрядки касательных усилий на модели не противоречат данным, полученным в естественных условиях, но в то же время не охватывают весь ряд действующих процессов, контролирующих сейсмичность из-за проявления масштабности. С увеличением числа n материал упрочняется — возрастает как предельная нагрузка T^* (точка A), так и величина скачков при триггерной разрядке AC (см. первый скачок AB) с активацией энерговыделения (заштрихованная часть под кривой разгрузки).

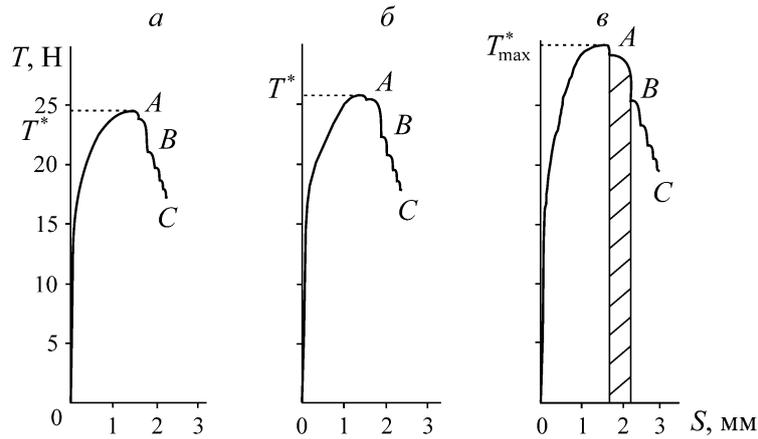


Рис. 3. Диаграммы испытаний материала после изменяющегося числа циклов деформирования n : a — 10; b — 20; v — 60 (энергия ударов $U = 3.5 \cdot 10^{-3}$ Дж, жесткость пружины $K = 4.8$ кН/м)

Эксперименты показали, что стабилизация параметров деформирования кварцевого песка возникает приблизительно после 50 циклов и выше: диаграммы нагружения становятся идентичными диаграмме стационарного состояния материала (рис. 3в). К этому выводу приводят и результаты циклического деформирования (рис. 2), а также график на рис. 4, построенный в координатах безразмерного отношения предельных касательных усилий упаковок еще не сформировавшейся структуры T^* и стационарного состояния при большом числе циклов деформирования T_{\max}^* .

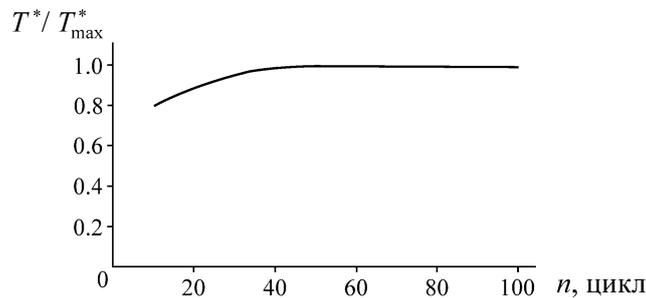


Рис. 4. Безразмерное отношение предельных касательных усилий в зависимости от числа циклов деформирования n (T^* — предельные касательные усилия несформировавшейся упаковки частиц; T_{\max}^* — предельные касательные усилия стационарной упаковки)

Полученные результаты стабилизационного деформирования рыхлого песка свидетельствуют об уменьшении неоднородности структуры упаковки и усилении механических свойств. В результате динамические эффекты, характеризующие неустойчивое скольжение, активизируются: увеличивается длина скачка смещений, сброс усилий, скорость и ускорение пластины.

РЕЛАКСАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ

Любое тело, нагруженное статической нагрузкой при неизменной деформации, со временем характеризуется самопроизвольным уменьшением внутренних напряжений — релаксацией. Для горных пород падение напряжений зависит от исходного уровня напряжений и степени вязкости горных пород. Падение напряжений может происходить либо до нуля, либо до опре-

деленного значения и определяется периодом релаксации напряжений — временем, необходимым для уменьшения напряжений в e (2.718) раз. Для скальных пород эти значения составляют от 100 до 1000 лет, для слабых горных пород — несколько суток.

Уравнение релаксационного процесса запишем в следующем виде:

$$T_t = T_0 e^{-t/\theta},$$

где T_0 — первоначальное касательное усилие (напряжение) на пластине в момент окончания нагружения ($T_0 = T^*$); T_t — касательное усилие на пластине по истечении определенного периода времени; t — момент времени; θ — период релаксации напряжений.

На практике для характерных реологических свойств пород при меньшей длительности нагружения часто используют относительный показатель падения напряжений (R , %) за определенный период времени (часы, сутки, неделю, месяц и т. д.): $R = [(T_0 - T_t) / T_0] \cdot 100\%$.

Экспериментальный стенд на рис. 1 и средства измерений позволяют без каких-либо дополнительных устройств исследовать релаксацию кварцевого песка, а затем определить ее влияние на энерговыделение при триггерной разрядке. С этой целью диаграмму на рис. 5а сопоставим с диаграммой на рис. 5б, которая получена по той же методике, но разгрузка в ней проведена после пятичасовой паузы. В этот промежуток времени записана кривая релаксации касательных усилий AB (рис. 5в). Точка A на кривой, как и прежде, соответствует предельному значению касательной нагрузки $T_0 = T^*$. Пером графопостроителя по направлению стрелки она перенесена в начало кривой релаксации, записываемой в функции времени t .

После окончания времени релаксации точка B перенесена на диаграмму рис. 5б, чтобы провести аналогичную триггерную разгрузку BC от пяти одинаковых сейсмоимпульсов. Штриховая линия AB на разрыве диаграммы показывает падение усилий и небольшое смещение пластины ΔS^* от силы растяжения предварительно сжатой пружины в разупрочняющемся во времени материале. На рис. 5а, б заштрихованные площади под разгрузочными кривыми AC и BC пропорциональны суммарному энерговыделению от воздействия одинаковых пяти сейсмоимпульсов при триггерной разгрузке. Видно, что за счет релаксации касательных усилий энерговыделение уменьшилось приблизительно в 1.8 раза. Относительный показатель падения усилий за время $t = 5$ ч составил $R = 13.2\%$.

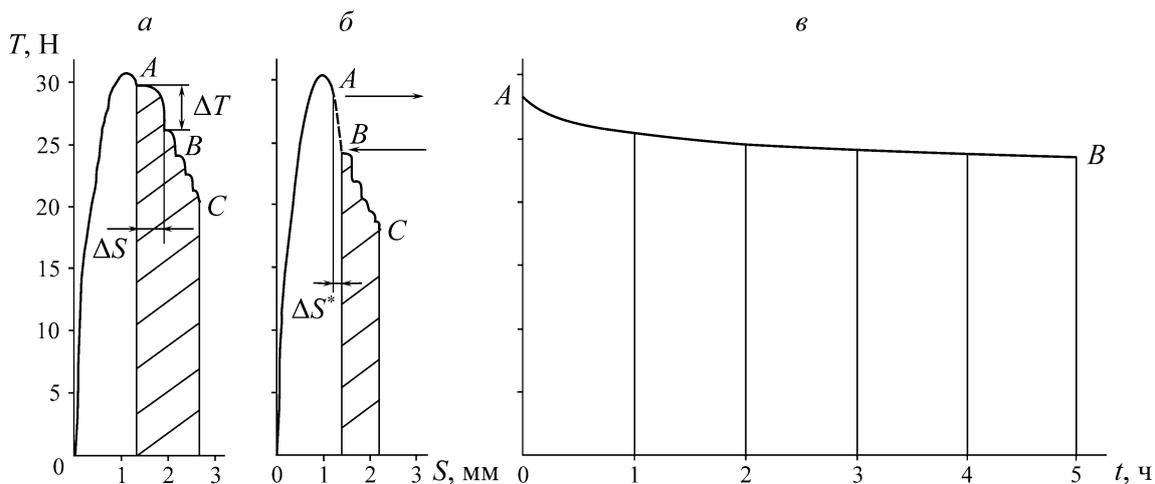


Рис. 5. Диаграмма стабилизационного деформирования, нагружения до предельной нагрузки и разгрузка, осуществленные без фильтрации воздушного потока. Разгрузка инициирована серией из пяти ударов маятника с энергией $U = 3.5 \cdot 10^{-3}$ Дж: а — сразу после нагружения; б — после пятичасовой паузы; в — кривая релаксации касательных усилий AB ($K = 2.8$ кН/м)

Для определения периода релаксации касательных усилий экспериментальную кривую на рис. 5в аппроксимируем уравнением экспоненты $y = y_0 e^{-\alpha x}$, где $x = t$ — момент времени. Из анализа экспериментальных данных после 1 ч выдержки находим численное выражение экспоненты $y = 72.715 e^{-0.0196x}$. Запишем равенство $-t/\theta = -0.0196t$, откуда период релаксации $\theta = 51$ ч.

Релаксация касательных усилий и последующая триггерная разгрузка под влиянием фильтрации воздушного потока показана на рис. 6. Здесь приведена диаграмма нагружения (рис. 6а) до предельной нагрузки — точки А без фильтрации, которая затем перенесена на начало кривой релаксации (рис. 6б). Падение касательных усилий АВ (рис. 6б) и последующая триггерная разгрузка ВС (рис. 6а) проведены под воздействием фильтрационного потока через прослойку кварцевого песка.

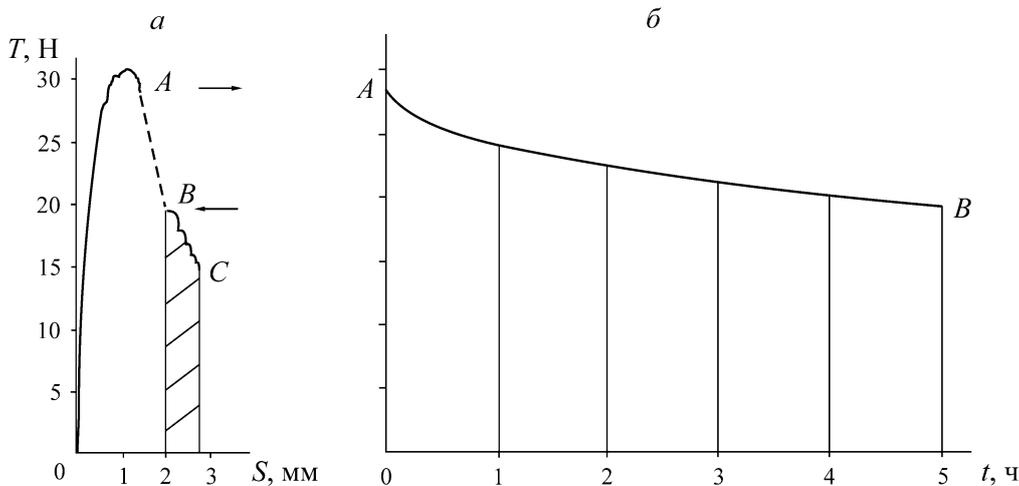


Рис. 6. Нагружение и разгрузка после релаксации касательных усилий (а) и кривая релаксации под воздействием фильтрации с объемным расходом воздуха $Q = 71 \text{ см}^3/\text{с}$ (б)

Из рис. 6б видно, что фильтрационный поток активизировал падение касательных усилий: за время $t = 5$ ч относительный показатель составил $R = 33.3\%$, а период релаксации уменьшился до $\theta = 17$ ч. Численное выражение экспоненты после одного часа выдержки представляется в виде уравнения $y = 71.133 e^{-0.0579x}$. Таким образом, за счет глубокого релаксационного падения касательных усилий под воздействием воздушной фильтрации триггерное энерговыделение уменьшилось приблизительно в 1.25 раза.

ВЛИЯНИЕ СКАЧКА ФИЛЬТРАЦИОННОГО ВОЗДУШНОГО ПОТОКА НА АКТИВИЗАЦИЮ РАЗРЯДКИ МАССИВА

На рис. 7 приведены диаграммы нагружения материала до предельной нагрузки — точки А с последующей динамической разгрузкой АВ, инициированной не сейсмоимпульсом от удара маятника, а скачком фильтрационного воздушного потока в точке А при трех значениях объемного расхода воздуха Q (каждый самостоятельно вызывает триггерный эффект). Жесткость нагружающей пружины в опытах постоянна: $K = 4.8 \text{ кН/м}$.

Триггерная разгрузка воздухом получена ранее в виде серии последовательных одинаковых скачков падающих усилий, возникающих по мере плавно нарастающего от нуля фильтрационного потока [16]. Разрядка осуществлялась выделением энергии в виде отдельных порций, что уменьшает риск катастрофических последствий.

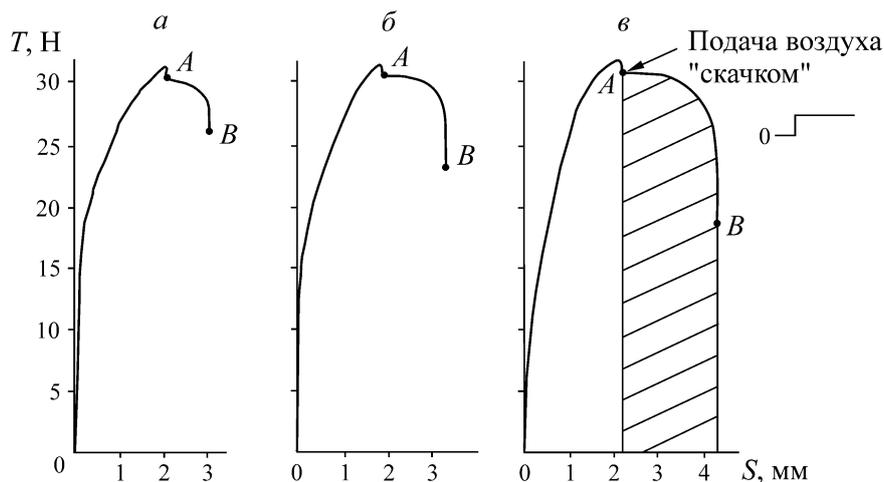


Рис. 7. Диаграммы, в которых предварительное стабилизационное деформирование и нагружение материала получены без фильтрации воздуха, а частичная разгрузка осуществлена потоком воздуха с объемным расходом Q ($\text{см}^3/\text{с}$), скачком нагнетаемого в образец: a — 230; b — 470; v — 1200

Способ подачи воздушного флюида скачком с большим расходом воздуха моделирует прорыв газа через разлом в естественных условиях. Скачкообразная подача воздуха осуществляется с помощью устройства быстроразъемного соединения (фитинга) для шлангов высокого давления, входящего в состав оборудования, используемого компрессора Pacific-24 с реверсом 24 л. В этом случае фильтрация газа оказывает более сильное влияние на активизацию разрядки упругой энергии, поскольку вмещается в одном импульсе падающей нагрузки. Сравнивая данные энерговыделения от фильтрационного потока воздуха AB (рис. 7в) и энерговыделения, инициированного первым сейсмоимпульсом от удара маятника (рис. 3в) (и в том и другом случае стационарных упаковок песка), получено, что высвободившаяся упругая энергия в первом случае возросла до значения, превосходящего энергию от сейсмоимпульсной разрядки более чем в 4 раза.

Зависимость разрядки упругой энергии от амплитуды скачка объемного расхода воздуха при двух значениях жесткости нагружения $K = 4.8$ и 9.0 кН/м показана на рис. 8. Видно, что энерговыделение при более мягком нагружении $K = 4.8$ кН/м (кривая 1) превосходит энергию разрядки (кривая 2). При уменьшении жесткости нагружения возрастает энергоемкость деформационного накопления упругой энергии и ее разрядка. При значении $Q = 2000$ $\text{см}^3/\text{с}$ превышение энергии составило 139 %.

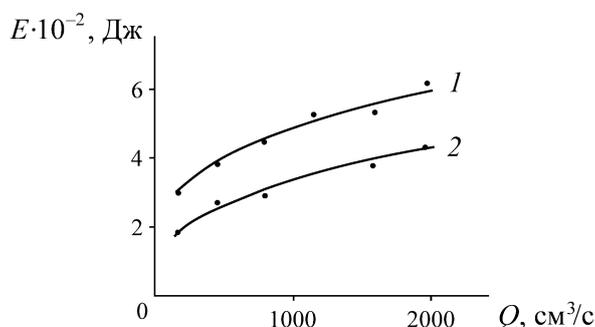


Рис. 8. Энерговыделение в зависимости от объемного расхода воздуха Q , воздействующего на образец “скачком” при двух значениях жесткости нагружающей пружины K , кН/м: 1 — 4.8; 2 — 9.0

ВЫВОДЫ

Лабораторное моделирование триггерных эффектов на разломе горных пород показало, что динамические эффекты в виде скачков смещений вдоль бортов разлома зависят от механического состояния заполнителя. Максимальный эффект, при котором реализуется неустойчивое скольжение, достигается циклическим деформированием материала. По реакции нагружающей пружины устройства выявлено, что используемый кварцевый песок приобретает это свойство после 50 циклов деформирования. Под воздействием фильтрации, неспособной самостоятельно вызвать триггерный эффект, релаксация касательных усилий предельно нагруженного сыпучего слоя проходит более интенсивно. Фильтрация с объемным расходом воздуха $71 \text{ см}^3/\text{с}$ ускоряет релаксацию, уменьшая ее период приблизительно в 3 раза. Воздействие одинаковых воздушных потоков, подаваемых в одном случае скачком, в другом — плавным нарастанием, вызывает разную реакцию напряженной сыпучей среды. Скачок, моделирующий в естественных условиях прорыв газа через разлом, активизирует саморазрядку с более интенсивным выделением упругой энергии, сконцентрированной в одном импульсе разгрузки. В такой ситуации риск катастрофических последствий увеличивается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Проблемы** механики деформируемых твердых тел и горных пород: сб. ст. к 75-летию Е. И. Шемякина / под ред. Д. Д. Ивлева, Н. Ф. Морозова. — М.: Физматлит, 2006. — 864 с.
2. **Шемякин Е. И.** Сейсмозрывные волны в процессах горного производства. — М.: ННЦ ГП – ИГД им. А. А. Скочинского. — 75 с.
3. **Кочарян Г. Г.** Геомеханика разломов. — М.: Геос, 2016. — 424 с.
4. **Бобряков А. П., Ревуженко А. Ф., Шемякин Е. И.** О возможном механизме перемещения масс Земли // ДАН СССР. — 1983. — Т. 272. — № 5. — С. 1097–1099.
5. **Бобряков А. П., Ревуженко А. Ф., Шемякин Е. И.** Приливное деформирование планет: опыт экспериментального моделирования // Геотектоника. АН СССР. — 1991. — № 6. — С. 21–34.
6. **Молчанов А. Е.** Механика триггерного воздействия при искусственном провоцировании землетрясения // Триггерные эффекты в геосистемах: материалы Всерос. семинара-совещ., 22–24 июня 2010 г. — М.: Геос, 2010. — С. 96–104.
7. **Трофимов В. А., Макеева Т. Г., Филиппов Ю. А.** Оценка устойчивости породного массива // Триггерные эффекты в геосистемах: материалы IV Всерос. конф., 6–9 июля 2017 г. — М.: Геос, 2017. — С. 340–350.
8. **Кувшинов Г. Г.** Истечение зернистого материала из отверстия при наличии противотока газа // ПМТФ. — 1995. — Т. 36. — № 6. — С. 85–93.
9. **Цубанов А. Г., Забродский С. С., Антонишин Н. В.** О влиянии фильтрации газа на истечение сыпучего материала // Исследование процессов в аппаратах с дисперсными системами: сб. тр. — Минск: Наука и техника, 1969. — С. 133–137.
10. **Борисов Ю. И., Ходак Л. З.** Механизм движения сыпучих тел при истечении их через отверстие // Инж.-физ. журн. — 1965. — № 6. — Т. 8. — С. 712–719.
11. **Цубанов А. Г.** О влиянии перепада давления на перетекание сыпучего материала по вертикальному каналу // Инж.-физ. журн. — 1969. — № 2. — Т. 7. — С. 254–260.
12. **Курленя М. В., Сердюков С. В.** Десорбция и миграция метана в термодинамически неравновесном угольном массиве // ФТПРПИ. — 2010. — № 1. — С. 61–68.
13. **Гуфельд И. Л., Новоселов О. Н.** Сейсмический процесс в зоне субдукции. Мониторинг фонового режима. — М.: ВПО МГУЛ, 2014. — 100 с.

14. **Дмитриевский А. Н., Валяев Б. М.** Дегазация Земли: геотектоника, геодинамика, геофлюиды, нефть и газ, углеводороды и жизнь. — М.: Геос, 2010. — 712 с.
15. **Стажевский С. Б.** О триггерах и механизме океанского рифтогенеза. Триггерные эффекты в геосистемах: тез. докладов IV Всерос. конф. с междунар. участием, 6–9 июня 2017. — М.: Геос, 2017. — С. 95–96.
16. **Бобряков А. П., Ревуженко А. Ф.** Лабораторное моделирование триггерных эффектов вследствие фильтрации газа в разломных зонах горных пород // ФТПРПИ. — 2018. — № 5. — С. 12–17.
17. **Ларин В. Н.** Гипотеза изначально гидридной Земли. — М.: Недра, 1980. — 216 с.
18. **Ларин В. Н.** Наша Земля (происхождение, состав, строение и развитие изначально гидридной Земли). — М.: Агар, 2005. — 248 с.
19. **Линьков А. М.** Численное моделирование сейсмических и асейсмических событий в геомеханике // ФТПРПИ. — 2005. — № 1. — С. 19–33.
20. **Курленя М. В., Опарин В. Н., Ревуженко А. Ф., Шемякин Е. И.** О некоторых особенностях реакции горных пород на взрывные воздействия в ближней зоне // ДАН СССР. — 1987. — Т. 293. — № 1. — С. 67–70.
21. **Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И.** Об эффекте аномально низкого трения в блочных средах // ФТПРПИ. — 1997. — № 1. — С. 3–16.
22. **Макаров П. В., Перышкин А. Ю.** Численное изучение процессов генерации и распространения медленных волн деформации в упруго-пластичных средах // Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций: XII Междунар. конф., 21–25 мая 2018 г. — Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2018. — С. 287.
23. **Макаров П. В., Перышкин А. Ю.** Моделирование “медленных движений” — автоволн неупругой деформации в пластичных и хрупких материалах и средах // Физ. мезомеханика. — 2016. — Т. 19. — № 2. — С. 30–46.
24. **Зуев Л. Б., Данилов В. И., Баранникова С. А.** Физика макролокализации пластического деформирования. — Новосибирск: Наука, 2008. — 328 с.

Поступила в редакцию 12/IX 2019

После доработки 25/IX 2019

Принята к публикации 27/XI 2019