

УДК 624.131.21 + 539.37 + 66.067.1

**ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРИГГЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ
ВСЛЕДСТВИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА В РАЗЛОМНЫХ ЗОНАХ ГОРНЫХ ПОРОД**

А. П. Бобряков, А. Ф. Ревуженко

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

Рассматривается процесс сдвига жесткой шероховатой пластины в сыпучей среде. Анализируется влияние трех факторов: степени жесткости нагружения, слабых ударных воздействий и фильтрационного потока воздуха через сыпучую среду. Показано, что слабые ударные воздействия и фильтрационный поток могут по отдельности и вместе играть роль триггера для неконтролируемого динамического высвобождения упругой энергии массива.

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

DOI: 10.15372/FTPRPI20180502

Вопрос о поведении геосреды на разломах и границах структурных блоков является одним из актуальных в геомеханике [1]. Для его теоретического исследования принципиальных препятствий нет. Современные вычислительные ресурсы позволяют реализовывать практически любые нелинейные модели. Проблема состоит в формулировке адекватных моделей. Последнее невозможно без обращения к экспериментальным данным, натурным и полученным в лабораторных условиях. Моделирование в лабораторных условиях сопряжено с двумя принципиальными трудностями. Первая связана с тем, что в лаборатории технически невозможно выдержать все критерии, которые диктуются теорией подобия и размерностей. Вторая трудность заключается в неопределенности параметров среды, которые фигурируют в соответствующих критериях. Поэтому есть смысл моделировать только отдельные качественные черты реальных процессов.

В настоящей работе рассмотрена простейшая схема, когда разлом моделируется шероховатыми жесткими пластинами, установленными параллельно друг другу. Зазоры между пластинами заполнены сыпучим материалом. Нагружение — мягкое с заданной жесткостью. Исследуется взаимное влияние трех факторов: степени жесткости нагружения, слабого фильтрационного потока воздуха через разлом и слабых ударных воздействий, которые при определенных условиях могут сыграть роль триггера.

Такая постановка имеет смысл и в ситуациях, когда роль разлома играет поверхность локализации деформаций. В частности, при выпуске сыпучих материалов образуется блочная структура, выделенная поверхностями скольжения. Фильтрация меняет условия скольжения и оказывает влияние на напряженно-деформированное состояние среды. В естественных условиях процесс накопления упругой энергии на разломах горных пород может занимать несколько десятков, а то и сотни лет, и заканчивается достижением предельно возможных значений напряжений и их последующей разрядкой. Последняя может быть мгновенной или медленной. Такого рода процессы в геологии квалифицируются как сейсмические и асейсмические события [2].

В последние десятилетия все большую роль играют техногенные землетрясения, спровоцированные деятельностью человека [3, 4]. Одним из возможных типов триггерных воздействий на разлом является уменьшение трения между берегами [5]. Так, воздействие взрыва на горный массив уменьшает трение в момент отрицательной волны разгрузки. Лабораторное изучение поведения пород при высоких давлениях показало, что жидкость, присутствующая в порах, действует как смазка в трещинах, поэтому обводнение высокими плотинами приводит к увеличению числа землетрясений [3]. По результатам исследований в этой области можно констатировать существенное влияние на провоцирование и режим скольжения по разлому таких свойств заполнителей, как дилатансия, внутреннее трение (сухое или вязкое), прочность, поровое давление и т. д. [6–9].

В [10] исследовался процесс сдвига сухого сыпучего материала, на который накладывался слабый поток воздуха. Процессы деформирования с одновременной фильтрацией происходят и в естественных условиях, связанных с дегазацией земли, через системы сообщающихся трещин и пор [11, 12]. Полученное в экспериментах существенное уменьшение пластического модуля сдвига при фильтрации стимулировало проведение лабораторных исследований влияния фильтрации на режим скольжения по разлому и сопутствующему при этом энерговыделению [10].

В настоящей работе использовался стенд, описанный в [12]. Схема стенда, представляющего собой камеру размером $170 \times 190 \times 170$ мм, заполненную кварцевым песком со средним размером частиц 0.3 мм [13], приведена на рис. 1.

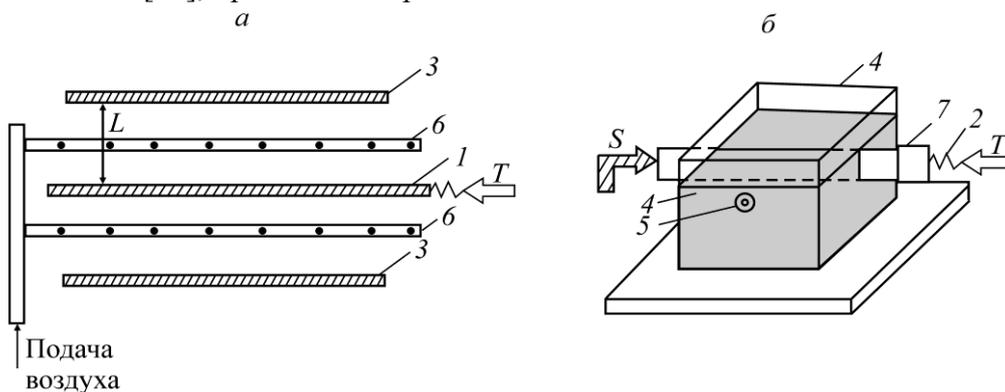


Рис. 1. Экспериментальный стенд: а — схема нагружения (вид сверху); б — общий вид устройства

Металлическая подвижная пластина 1, погруженная в сыпучий материал под действием сдвигающих усилий T , создаваемых винтом через пружину 2, смещается на величину S относительно двух других неподвижных пластин 3 (рис. 1).

В середине камеры параллельно стенкам размещена подвижная металлическая пластина (46×290 мм), оклеенная шлифовальной лентой (зерно P160). Для исключения попадания сыпучего материала в зазор между пластиной и стенками камеры использовано уплотнение. Пластина опирается на ролики и имеет возможность смещения в горизонтальном направлении. Смещение S измерялось по величине прогиба гибкой консоли, закрепленной одним концом на неподвижном основании, а другим на пластине. Прогиб фиксировался тензодатчиком, сигнал с которого через усилитель подавался на горизонтально отклоняющийся вход самописца. Усилие сдвига T создавалось микрометрической подачей винта и передавалось на пластину через упругий элемент 2 жесткостью K и тензометрический датчик усилий 7.

Подача воздуха осуществлялась через трубки 6 ($\varnothing 6$ мм), перфорированных отверстиями $\varnothing 2$ мм, с шагом 15 мм. С одного конца трубки заглушены, другим концом параллельно соединены с распределительной трубкой подачи воздуха от компрессора Pacific-24. Трубки уложены на дно камеры. Для исключения попадания частиц в отверстия поверхность трубок закрыта тремя слоями нетканого воздухопроницаемого полотна спанбонд, используемого в производстве медицинских масок. В качестве триггера использовались одиночные удары маятника по боковой стенке камеры 4 в точке 5 на уровне центра пластины. Энергия удара U задавалась углом отклонения массы от положения равновесия (как потенциальная энергия массы) и составляла в опытах 0.175, 0.35, 1.40, 2.45, 3.50 и 55 Дж $\cdot 10^{-3}$. На пластину приходит порядка 1 % данной энергии [14].

Как и следовало ожидать, каждый из факторов по отдельности (слабые удары и фильтрация газа) может сыграть роль триггера. На рис. 2 приведены диаграммы предельно напряженного состояния системы, в которых разгрузка осуществлена фильтрацией нарастающего через прослойку сыпучего материала воздушного потока. Данные диаграммы записаны при мягком и жестком нагружении. В точке A началась подача воздуха с постепенным увеличением его расхода Q от 0 до 1200 см³/с в течение 10 с (точка B диаграммы).

Разгрузка осуществляется серией одинаковых скачков сброса напряжений. Под воздействием плавно нарастающей фильтрации воздуха по достижении критического значения система теряет устойчивость, скачком разрушается и останавливается, затем “ждет” нового уровня воздуха и снова динамически разрушается и т. д. Средняя величина одного сброса усилий на пластине составила $\Delta T = 2.2$ Н (рис. 2а), $\Delta T = 2.8$ Н (рис. 2б). Как видно из диаграмм, меньшая жесткость пружины при разгрузке приводит к меньшим сбросам усилий ΔT , но к большим амплитудам скачков смещений ΔS . После семи триггерных воздействий суммарная высвободившаяся энергия при жесткости пружины $K = 4.8$ кН/м составила $E = 5.3 \cdot 10^{-2}$ Дж, при $K = 9$ кН/м — $E = 3.2 \cdot 10^{-2}$ Дж. Увеличение жесткости нагружения приводит к увеличению модуля спада диаграммы.

Подача воздушного потока может вызвать неустойчивость в напряженной сдвигом сыпучей среде и по достижении некоторого критического порога фильтрации система может скачком саморазгрузиться аналогично разрядке от слабого удара. На рис. 3 приведены результаты испытаний, в которых используется смешанная схема разгрузки — фильтрацией и слабыми ударами, т. е. даны две диаграммы предельно нагруженного материала, который подвергался воздействию воздушной фильтрации до появления срыва — первого скачка. Последующая разгрузка осуществлялась либо серией одинаковых слабых ударов (а), либо слабыми ударами совместно с фильтрацией (б). Видно, что присутствие фильтрации активизирует энерговыделение. Так, энергия первого скачка разгрузки триггером (рис. 3б) превосходит энергию разгрузки (рис. 3а) более чем в 2.5 раза.

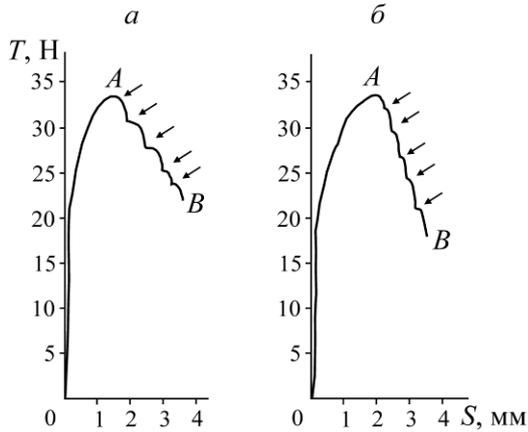


Рис. 2. Диаграммы нагружения пластины до предельной касательной нагрузки без подачи воздуха с последующей разгрузкой при двух значениях жесткости пружины K , кН/м: a — 4.8; b — 9. Стрелками отмечены точки начала неустойчивого скольжения (срыва) пластины

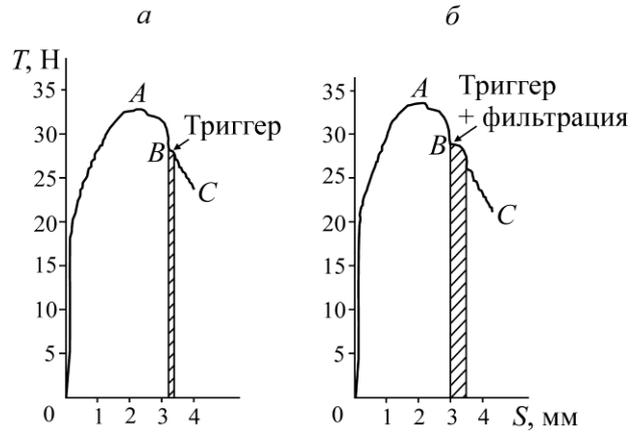


Рис. 3. Диаграммы нагружения материала до предельной величины A и последующая разгрузка на участке BC : a — без фильтрации; b — с фильтрацией (энергия единичного удара $U = 1.4 \cdot 10^{-3}$ Дж, жесткость пружины $K = 4.8$ кН/м)

Увеличение воздушного потока изменяет механические свойства самой среды, уменьшая ее внутреннее трение и значительно ослабляя основную характеристику сопротивляемости материала сдвиговой деформации — модуль сдвига [10]. Деформирование ослабленного материала приводит к уменьшению предельных значений касательных усилий на этапе нагружения пластин. На рис. 4 представлена зависимость предельных касательных усилий на пластине от возрастающего объема потока воздуха, из которого видно, что в исследованном диапазоне они линейно падают приблизительно в 1.3 раза.

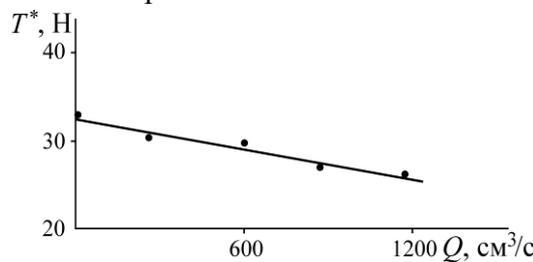


Рис. 4. Зависимость предельных значений касательных усилий T^* на пластине при изменении расхода потока воздуха

Таким образом фильтрационный поток и слабые удары могут играть роль триггера и служить толчком развития катастрофических последствий. В указанных опытах такого развития нет ввиду достаточно большой жесткости нагружения. Однако, если жесткость снизить (задать на границе самосдвигающее напряжение), то любые скачки напряжения приведут к динамическому развитию сдвига.

Диаграмма на рис. 5а показывает динамику первого скачка напряжений AB при нагружении без фильтрации, участок BC — последующие 6 ударов, а диаграмма на рис. 5б — нагружение с фильтрацией (подача воздуха в точке A). На рис. 6 изменения сброса касательного усилия на пластине ΔT от первого триггерного воздействия с фильтрацией (кривая 2) и без фильтрации (кривая 1) воздуха приведены в зависимости от времени. Скачок падения силы длится порядка 100 мс.

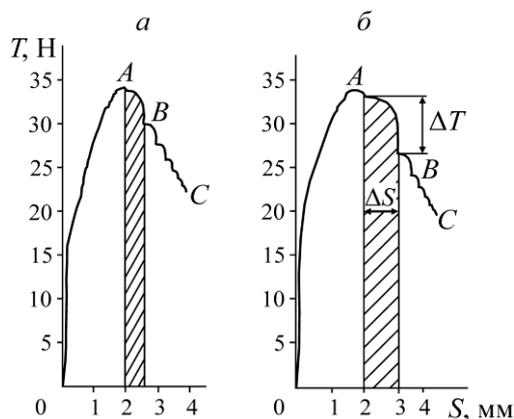


Рис. 5. Диаграммы нагружения до предельной величины; частичная разгрузка пластины осуществлена от 7 ударов при двух режимах: *a* — без фильтрации воздуха; *b* — с фильтрацией воздуха $Q = 470 \text{ см}^3/\text{с}$ (энергия ударов $U = 3.5 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}$; жесткость пружины $K = 4.8 \text{ кН/м}$)

График энерговыделения в зависимости от числа ударов приведен на рис. 7. Высвобождаемая энергия пропорциональна заштрихованной площади под участками разгрузочных кривых на рис. 5. Видно, что фильтрация способствует большему высвобождению накопленной энергии. Так, энерговыделение от первого триггерного воздействия с фильтрацией воздуха (кривая 2) превосходит энергию разгрузки без фильтрации более чем в 1.8 раза.

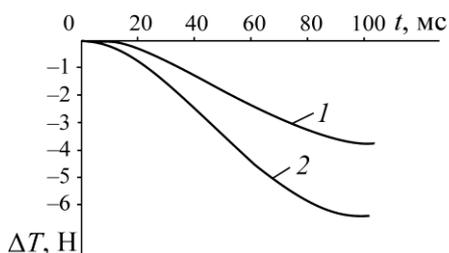


Рис. 6. Величина сброса касательных усилий во времени от первого триггерного воздействия: 1 — без фильтрации воздуха; 2 — с фильтрацией воздуха, $Q = 470 \text{ см}^3/\text{с}$ (энергия удара маятника $U = 3.5 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}$, жесткость пружины $K = 4.8 \text{ кН/м}$)

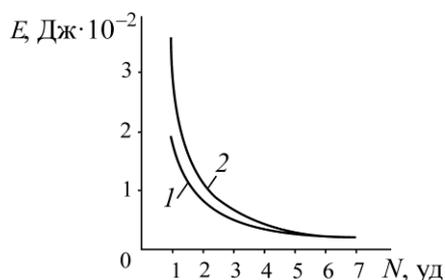


Рис. 7. Энерговыделение в зависимости от порядкового номера триггерного воздействия: 1 — без фильтрации воздуха; 2 — с фильтрацией воздуха $Q = 470 \text{ см}^3/\text{с}$

Можно ожидать, что в реальной ситуации фильтрационный поток газа будет инициировать высвобождение упругой энергии массива.

ВЫВОДЫ

Физическое моделирование в лабораторных условиях показывает, что:

- 1) фильтрационный поток флюида через разлом горных пород может сыграть роль триггера для неконтролируемого высвобождения потенциальной энергии массива;
- 2) увеличение интенсивности потока флюида, уменьшающее предельное напряжение сдвига, вызывает высвобождение упругой потенциальной энергии массива;
- 3) совместное действие слабых ударных нагрузок и фильтрационного потока приводит к увеличению высвобождаемой энергии за один удар.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кочарян Г. Г. Геомеханика разломов. — М.: Геос, 2016. — 424 с.
2. Линьков А. М. Численное моделирование сейсмических и асейсмических событий в геомеханике // ФТПРПИ. — 2005. — № 1. — С. 19–33.
3. Адушкин В. В., Турунтаев С. Б. Техногенная сейсмичность индуцированная и триггерная. — М.: ИДГ РАН, 2015. — 364 с.
4. Трофимов В. А., Макеева Т. Г., Филиппов Ю. А. Оценка устойчивости породного массива. Триггерные эффекты в геосистемах (Москва, 6–9 июля 2017 г.): Материалы IV Всерос. конф. с междунар. участием. — М.: Геос, 2017. — С. 340–350.
5. Молчанов А. Е. Механика триггерного воздействия при искусственном провоцировании землетрясения // Триггерные эффекты в геосредах: материалы всерос. Семинара-совещ., 22–24 июня 2010 г. / под ред. акад. РАН В. В. Адушкина, проф. Г. Г. Кочаряна. — М.: Геос, 2010. — С. 96–104.
6. Адушкин В. В., Кочарян Г. Г., Новиков В. А. Исследование режимов движения по разлому // Физика Земли. — 2016. — № 5. — С. 13–24.
7. Кочарян Г. Г., Остапчук А. А. Влияние вязкости тонких пленок на закономерности фрикционного взаимодействия блоков горной породы // ДАН. — 2015. — Т. 463. — № 3. — С. 343–346.
8. Кочарян Г. Г., Остапчук А. А., Мартынов В. С. Изменение режима деформирования разлома в результате инъекции флюида // ФТПРПИ. — 2017. — № 2. — С. 20–28.
9. Кочарян Г. Г., Кулюкин А. А., Павлов Д. В. Роль нелинейных эффектов в механике накопления малых возмущений // Физическая мезомеханика. — 2005. — № 9. — С. 5–14.
10. Бобряков А. П., Ревуженко А. Ф. О влиянии фильтрации газа на дилатансию и напряженное состояние сыпучего материала // ФТПРПИ. — 2018. — № 3. — С. 23–28.
11. Гуфельд И. Л., Новоселов О. Н. Сейсмический процесс в зоне субдукции. Мониторинг фонового режима. — М.: МГУЛ, 2014. — 100 с.
12. Дмитриевский А. Н., Валиев Б. М. Дегазация Земли: геотехника, геодинамика, геофлюиды; нефть и газ; углеводороды и жизнь. — М.: Геос, 2010. — 712 с.
13. Бобряков А. П. Моделирование триггерных эффектов в разломных зонах горных пород // ФТПРПИ. — 2013. — № 6. — С. 35–44.
14. Бобряков А. П., Косых В. П., Ревуженко А. Ф. Триггерное инициирование разрядки упругой энергии в напряженной геосреде // ФТПРПИ. — 2015. — № 1. — С. 14–22.

Поступила в редакцию 10/V 2018