

УДК 550.34

**ИНЖЕКЦИЯ ФЛЮИДА
КАК МЕТОД ИЗМЕНЕНИЯ ЭНЕРГИИ
ДИНАМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ**

В.С. Мартынов, А.А. Остапчук, А.М. Будков

ИДГ РАН

В настоящей работе представлены результаты лабораторных и численных экспериментов, в которых исследуется влияние флюида на режим деформирования модельного разлома. Показано, что незначительные вариации свойств флюида могут привести к радикальному изменению реологии разлома и реализуемого режима деформирования.

DOI: 10.26006/IDG.2018.10.20184

Введение

Инженерная деятельность часто приводит к интенсификации сейсмичности или её возникновению в ранее асейсмических областях, например, при разработке месторождений углеводородов, работе гидротермальных станций, строительстве дамб, ведении горных работ [Адушкин, Турунтаев, 2015; Bondrachuk et al., 2012; Kangi, Heidari, 2008; Bischoff et al., 2010] и др. Спектр индуцированных сейсмических событий включает как события медленного скольжения и слабые землетрясения, так и опасные крупные землетрясения. Понимание закономерностей формирования различных режимов деформирования в перспективе может помочь созданию инженерных методов «корректировки» сейсмического режима локальной области в масштабах месторождения.

Опасность неконтролируемого изменения состояния земных недр убедительно демонстрируют процессы, происходящие в центральных районах США на месторождениях сланцевого газа. Используемая при добыче технология множественных гидроразрывов приводит к нарушению флюидного режима и изменению напряженного состояния обширных областей, и вызывает тем самым резкий многократный рост сейсмичности [Ellworth, 2013]. Еще одним вероятным примером неконтролируемого изменения сейсмического режима является эксплуатация гидротермальной станции в Южной Корее, где после прекращения работ станции произошло крупное землетрясение с $M = 5.5$ [Grigoli et al., 2018]. При этом стоит отметить, что даже средние землетрясения с $M = 3-4$ могут приводить к крупным экономическим потерям из-за небольшой глубины залегания гипоцентра [Trutnevute, Azevedo, 2018].

В настоящее время основным механизмом, объясняющим вариацию сейсмического режима в результате инъекции флюида, считается изменение порового давления локальной области разломной зоны. Рост порового давления в локальной области нагруженного разлома приводит к снижению его прочности и, тем самым, может инициировать разрыв [Cornet et al., 1995; Turuntaev, Riga, 2017]. Однако рассмотрение только порового давления в качестве фактора, определяющего параметры индуцированных сейсмических событий, не может в полной мере объяснить широкий спектр регистрируемых сейсмических событий [Wei et al., 2015]. В этой связи, возможным механизмом является изменение фрикционных свойств зоны скольжения за счет наличия флюида. Например, в результате химических изменений под действием гидротермальных флюидов, осаждения глин и минералов существующая связность материала разлома может измениться. Если связность материала разлома снижена, то инициированные сейсмические события могут заблаговременно высвободить часть тектонических напряжений. Если связность возрастает, то существующие пластические деформации (крип) могут трансформироваться в прерывистое скольжение [например, Atkinson, 1984; Marone, 1998]. Влияние именно самого флюида (а не порового давления) на сдвиговую прочность контакта продемонстрировано [например, в Nouailletas et al., 2017], где уменьшение сдвиговой прочности контакта было обусловлено обработкой поверхности модельного разлома кислотой, при этом измерения шероховатости поверхности разлома до и после обработки показали минимальные изменения.

В настоящей работе представлены первые результаты исследований влияния свойств флюида на реологию разлома и закономерности релаксации избыточных напряжений. Полученные результаты указывают на новый возможный механизм,

который может обуславливать вариации деформационного режима локального участка разлома.

Лабораторные эксперименты

Лабораторные эксперименты проводились в постановке классической слайд-модели, в которой блок под действием нормального и сдвигового усилия скользит вдоль интерфейса. Блок размером $8 \times 8 \times 3$ см³, изготовленный из оргстекла, располагался на основании из оргстекла. Контакт между шероховатыми поверхностями заполнялся слоем гранулированного материала толщиной 2 мм. Нормальное усилие составляло 125 кПа и оказывалось набором грузов. Сдвиговое усилие прикладывалось через пружину с жесткостью 60 кН/м, конец которой смещался с постоянной скоростью 20 мкм/с. Заполнитель разлома состоял из смеси кварцевого песка (200–315 мкм) и глины (10–60 мкм), который увлажнялся различными флюидами.

В ходе эксперимента регистрировались сдвиговое усилие, действующее на подвижный блок, и перемещение блока. Точность измерения сдвигового усилия составляла 1 Н, перемещение 0.1 мкм. По полученным записям перемещения рассчитывалась скорость блока. Пример полученных в одном из экспериментов зависимостей представлен на рис. 1. В ходе экспериментов был реализован режим регулярного прерывистого скольжения – лабораторный аналог сейсмического цикла. Однако из-за структурной неоднородности кварц-глиняного заполнителя, параметры реализуемых событий в разных экспериментах серии могли варьироваться (рис. 1, б).

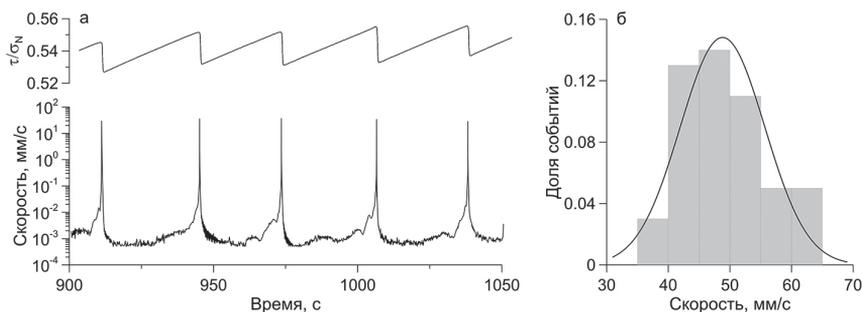


Рис. 1. Реализация прерывистого скольжения в одном из экспериментов серии: а – зависимости от времени сдвигового усилия и скорости смещения блока; б – распределение скоростей динамических событий, реализованных во всех экспериментах серии с заполнителем модельного разлома, состоящего из смеси песка (97.5%) и глины (2.5%). Заполнитель был увлажнен этиленгликолем (5% по массе)

Использование в качестве увлажняющего агента различных жидкостей позволили существенно варьировать параметры реализуемых событий (рис. 2). Если увлажнение водой дает максимальные амплитуды реализуемых событий и переход к стационарному крипу наблюдается при содержании глины $\sim 30\%$, то увлажнение глицерином – минимальные, а переход к стационарному крипу происходит при содержании глины $\sim 5\%$.

Опираясь на полученную выше зависимость (рис. 2), мы сделали попытку увеличить (не инициировать!) амплитуду динамических событий путем инъекции воды в локальную область модельного разлома. Для этого после установления режима

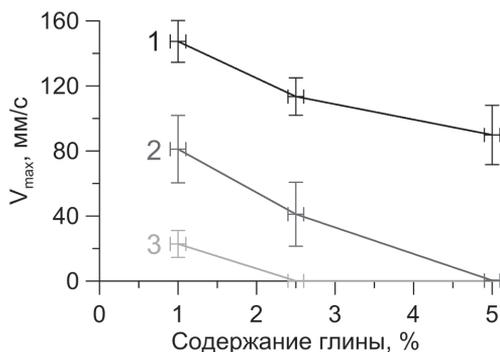


Рис. 2. Зависимость максимальной скорости смещения модельного разлома от содержания глины в материале-заполнителе, при увлажнении флюидом с вязкостью, мПа*с: 1–1, 2–16, 3–950

регулярного прерывистого скольжения в центральную зону межблокового контакта, увлажненного этиленгликолем, через 2 канала с диаметром 1 мм инжестировалась вода. В каждом отдельном эксперименте закачивалось 5 мл флюида с постоянным расходом в течение 15 с. При напряжениях близких к критическим в процессе инъекции из-за конечного времени процесса сдвиговое нагружение прекращалось; нагружение возобновлялось после завершения процесса инъекции. Локальное повышение порового давления создавалось только в момент инъекции и составляло ~5 кПа, что пренебрежимо мало по сравнению с уровнем нормальных напряжений и со сбросом напряжений во время динамического события. В процессе эксперимента инжеструемый флюид распространялся примерно на площади 80% от начальной площади контакта.

На рис. 3 представлена зависимость изменения параметров динамических событий в зависимости от момента инъекции. Можно видеть, что инъекция воды в центральную зону модельного разлома приводит к существенному изменению параметров событий. При этом эффективность изменения не зависит от момента инъекции. Стоит отметить, что при напряжениях близких к критическим, инъекция

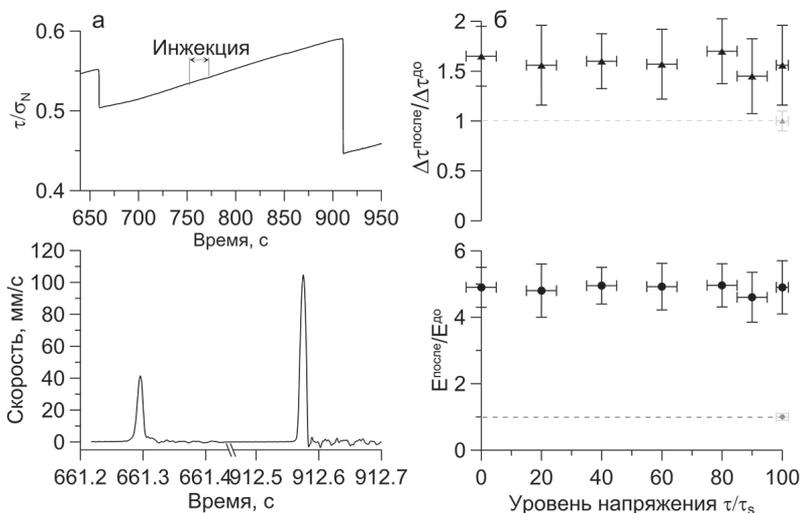


Рис. 3. Влияние инъекции флюида на параметры режима деформирования разлома в лабораторном эксперименте: а – сравнение сдвигового усилия и скорости смещения двух последовательных событий до и после инъекции; б – зависимость параметров динамических событий (сброс напряжений и максимальная кинетическая энергия смещения) от момента инъекции флюида

флюида в центральную зону разлома приводило к инициированию события практически без изменения его параметров. То есть незначительное даже самое слабое воздействие в предкритической области только инициирует подвижку.

Численное моделирование

Представленный выше сценарий мы смоделировали численно. В численных экспериментах мы рассмотрели 1D слайдер-модель, предложенную Барриджем и Кноповым [1966]. Модель представляет систему блоков, упруго связанных друг с другом (рис. 4). Каждый блок движется под действием упругих сил, действующих со стороны соседних блоков и драйвера, и сил трения, действующих вдоль интерфейса разлома. В наших расчетах мы рассматривали систему из 10 блоков. Так как при проведении лабораторных экспериментов в процессе инъекции поровое давление не оказывало существенного влияния на напряженное состояние, то инъекция флюида моделировалась изменением в определенный момент времени параметров модели у 8 блоков (так как в лабораторных экспериментах при инъекции область распространения флюида составляла примерно 80% площади контакта).

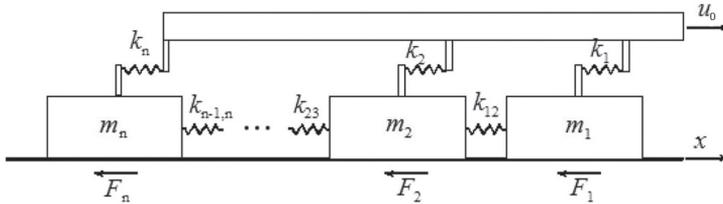


Рис. 4. Модель Барриджа и Кнопова. Блоки массой m_i движутся под действием упругих сил, действующих со стороны межблоковых пружин $k_{n-1,n}$ и пружин k_i , соединяющих блоки с драйвером, а также сил трения F_i . Драйвер перемещается с постоянной скоростью u_0

Уравнения движения системы блоков записываются в виде:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = k_1(u_0 t - x_1) - k_{12}(x_1 - x_2) - F_1 \\ m_2 \ddot{x}_2 = k_2(u_0 t - x_2) + k_{23}(x_2 - x_3) - F_2 \\ m_n \ddot{x}_n = k_n(u_0 t - x_n) + k_{n-1,n}(x_{n-1} - x_n) - F_n \end{cases} \quad (1)$$

где m_n , x_n – соответственно масса и смещение n -го блока, а $F_n = \mu S \sigma_{Nn}$ – действующая на него сила трения (μ – коэффициент трения, S – площадь контактной зоны, σ_{Nn} – нормальные напряжения). Для задания силы трения использовался закон трения «Rate & State»:

$$\mu = \mu_0 + a \ln \left(\frac{|\dot{x}|}{u^*} \right) + b \ln \left(\frac{u^* \theta}{D_c} \right), \quad (2)$$

где μ_0 – коэффициент трения, соответствующий стабильному скольжению со скоростью u^* ; a , b , D_c – эмпирические константы, θ – переменная состояния, \dot{x} – скорость перемещения. Переменная состояния θ определяется из кинетического уравнения:

$$\dot{\theta} = 1 - \left(\frac{|\dot{x}| \theta}{D_c} \right). \quad (3)$$

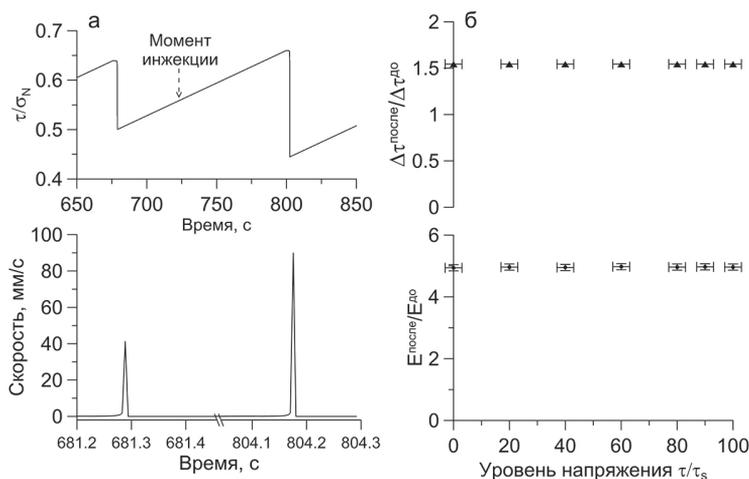


Рис. 5. Влияние инъекции флюида на параметры режима деформирования разлома в численном эксперименте: а – сравнение сдвигового усилия и скорости смещения двух последовательных событий до и после инъекции; б – зависимость параметров динамических событий (сброс напряжений и максимальная кинетическая энергия смещения) от момента инъекции флюида

В состоянии стабильного скольжения с некоторой скоростью $\dot{x} = u_0$ переменная состояния θ принимает значение $\theta = D_s/u_0$. Это значение используется в качестве начального условия при численном решении уравнения (2).

Система обыкновенных дифференциальных уравнений (1) совместно с уравнениями (2) и (3) решались численно методом Рунге-Кутты 4-го порядка аппроксимации. Эмпирические константы R&S модели были определены на основе анализа эпюр скоростей скольжения блока в экспериментах, представленных на рис. 2.

Полученные в численных расчетах закономерности изменения параметров динамических событий представлены на рис. 5. Можно видеть, что кривые качественно и количественно соответствуют результатам лабораторных экспериментов. В отличие от лабораторных экспериментов при напряжениях близких к пределу прочности ($\tau > 0.99\tau_s$) резкое изменение параметров трения приводит к инициированию слабого события, после чего происходит уже высокоамплитудный срыв.

Обсуждение

В ходе проведенных исследований было установлено сильное влияние инъекции флюида на параметры динамических событий. Было показано, что инъекцией флюида в контактную зону можно существенно увеличить амплитуду событий и энергию, излучаемую в виде сейсмических волн, в то время как эффект порового давления заключается в снижении амплитуды событий. В ряде работ говорится, что индуцированная сейсмичность должна рассматриваться как процесс, зависящий от времени [Gaucher et al., 2015]. Однако в условиях наших экспериментов, когда влиянием порового давления можно пренебречь в силу его малости, процесс инъекции воды никак не проявляется. Флюид, распространяясь вдоль модельного разлома, приводит к изменению фрикционных свойств интерфейса, что вызывает радикальное изменение закономерностей динамических событий, следующих

за моментом инъекции. То есть изменение фрикционных свойств интерфейса в результате воздействия может существенно изменить баланс энергии во время динамических событий [Kocharyan et al., 2017].

В представленных экспериментах в процессе инъекции флюида в центральную зону разлома, заполненную увлажненным гранулированным наполнителем, в поровом пространстве присутствуют жидкости двух различных фаз. Теоретическая оценка показывает, что время смешивания этиленгликоля и воды в условиях наших экспериментов составляет ~4 с [Желтов, 1986; Новоселов и др., 2006]. Учитывая, что рекуррентное время событий составляет ~150 с, то в первом приближении можно считать, что свойства интерфейса изменяются мгновенно после инъекции флюида. Это же подтвердили и численные эксперименты.

Изменение реологических свойств интерфейса разлома может объяснить и эффекты, наблюдаемые в природе. Так, в экспериментах, проведенных Y. Guglielmi et al. [2015], показано, что при инъекции флюида площадь зоны изменения режима скольжения в несколько раз превышает размер зоны изменения порового давления. Интересно, что динамические срывы начали происходить лишь после того, как размер зоны скольжения превысил радиус зоны повышенного, в результате закачки, порового давления. Аналогичные результаты получены в других работах, выполненных на большем масштабе. Зона скольжения по разлому, инициированного инъекцией флюида, распространяется на несколько характерных размеров участка изменения порового давления. Этот вывод сделан по результатам инъекции флюида как одиночной скважиной непосредственно в зону разлома, так и нагнетанием жидкости многими скважинами в значительном объеме массива.

Выводы

Показано, что свойства жидкости, увлажняющей интерфейс, существенно влияют на закономерности скольжения вдоль разлома. Вариации свойств жидкости способствуют реализации как быстрых, так и медленных мод скольжения.

Инъекция жидкости может привести к радикальному изменению параметров реализуемых динамических событий и увеличению кинетической энергии блока в момент срыва.

Изменение параметров скольжения в результате инъекции флюида наблюдается на любой стадии сейсмического цикла. Однако при напряжениях близких к критическим инъекция с высокой долей вероятности приведет к инициированию динамического события без изменения его параметров.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 18-35-00587, 17-05-01271).

Литература

Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенная сейсмичность – индуцированная и триггерная. М. : ИДГ РАН, 2015. – 364 с.

Желтов Ю.П. Разработка нефтяных месторождений. 1986. с. 208-212.

Новоселов А.Г., Тишин В.Б., Дужий А.Б. Справочник по молекулярной диффузии в системах газ – жидкость и жидкость – жидкость. В кн.: Новый справочник химика и

технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Ч. II. – СПб. : НПО «Профессионал», 2006. – 916 с.

Atkinson, B.K. (1984). Subcritical crack growth in geological materials. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012), 89(B6), 4077–4114.

Bischoff, M., Cete, A., Fritschen, R. et al. Coal Mining Induced Seismicity in the Ruhr Area, Germany // *Pure Appl. Geophys.* 2010. Vol. 167. P. 63–75. <https://doi.org/10.1007/s00024-009-0001-8>.

Bondarchuk, A., Ask, M.V.S., Dahlström, L.-O. et al. Rock mass behavior under hydropower embankment dams: a two-dimensional numerical study // *Rock Mech Rock Eng.* 2012. Vol. 45. P. 819–835. <https://doi.org/10.1007/s00603-011-0173-2>.

Cornet, F.H. Jianmin Y. Analysis of induced seismicity for stress field determination and pore pressure mapping // *Pure Appl. Geophys.* 1995. Vol. 145. P. 677–700. <https://doi.org/10.1007/BF00879595>.

Ellworth W.L. Injection-Induced Earthquakes // *Science.* 2013. Vol. 341. P. 1225942. Doi: 10.1126/science.1225942.

Gaucher E., Schoenball M., Heidbach O., Zang A., Fokker P.A., van Wees J.-D., Kohl T. Induced seismicity in geothermal reservoirs: A review of forecasting approaches // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2015. Vol. 52. P. 1473–1490.

Grigoli F., Cesca S., Rinaldi A.P., et al. The November 2017 Mw 5.5 Pohang earthquake: A possible case of induced seismicity in South Korea // *Science.* 2018. Vol. 360. P. 1003–1006. DOI: 10.1126/science.aat2010.

Guglielmi Y., Cappa F., Avouac J.-P., Henry P., Elsworth D. Seismicity triggered by fluid injection-induced aseismic slip // *Science.* 2015. Vol. 348. P. 1224–1226. DOI: 10.1126/science.aab0476.

Kangi A., Heidari N. Reservoir-induced seismicity in Karun III dam (Southwestern Iran) // *J Seismol.* 2008. Vol. 12. P. 519–527. <https://doi.org/10.1007/s10950-008-9104-4>.

Kocharyan G.G., Novikov V.A., Ostapchuk A.A., Pavlov D.V. A study of different fault slip modes governed by the gouge material composition in laboratory experiments // *Geophys. J. Int.* 2017. V. 208. P. 521–528.

Marone C. Laboratory-derived friction laws and their application to seismic faulting // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences.* 1998. Vol. 26. P. 643–696.

Nouailletas, O., Perlot, C., Rivard, P. et al. Impact of Acid Attack on the Shear Behaviour of a Carbonate Rock Joint // *Rock Mech Rock Eng.* 2017. Vol. 50. P. 1439–1451. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1182-6>.

Trutnevyte E., Azevedo I. Induced seismicity hazard and risk by enhanced geothermal systems: an expert elicitation approach // *Environmental Research Letters.* 2018. Vol. 13. № 3. 034004.

Turuntaev S.B., Riga V.Y. Non-linear effects of pore pressure increase on seismic event generation in a multi-degree-of-freedom rate-and-state model of tectonic fault sliding // *Nonlinear Processes in Geophysics.* 2017. Vol. 24. P. 215–225.

Wei S., Avouac J.-P., Hudnut K.W., et al. The 2012 Brawley swarm triggered by injection-induced aseismic slip // *Earth and Planetary Science Letters.* 2015. Vol. 422. P. 115–122.