

УДК 550.8.053

## ОЦЕНКА ДАВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИНЫ В ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ГИДРОРАЗРЫВУ ПЛАСТА

© 2022 г. Е. В. Новикова<sup>1\*</sup>, М. А. Тримонова<sup>1</sup>, С. Б. Турунтаев<sup>1</sup>,  
Е. В. Зенченко<sup>1</sup>, П. Е. Зенченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

\*E-mail: [helenvn97@gmail.com](mailto:helenvn97@gmail.com)

Гидро разрыв пласта является одним из основных способов повышения дебита нефте/газоносного месторождения. Существуют методы, в которых гидро разрыв используется для исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) разрабатываемого пласта. Данная работа была посвящена оценке корректности одного из таких методов определения НДС, основанного на известных давлениях образования трещины, при помощи лабораторных экспериментов. Некоторые пороупругие эффекты не учитываются в классических методах определения НДС. В работе было предложено скорректировать стандартную формулу для определения давления образования трещины с учетом эффекта обратного напряжения (*backstress*). Данный эффект заключается в дополнительном влиянии жидкости разрыва, которая отфильтровалась из скважины в окружающую ее среду, на эффективные напряжения, действующие на стенке скважины. В рамках работы были произведены теоретические оценки давления образования трещины, которые сравнивались с экспериментальными давлениями прорыва трещины. В результате анализа полученных данных было выявлено, что критическое напряжение на стенке скважины в лабораторных экспериментах достигается несколько позже из-за наличия эффекта *backstress*, что позволило уточнить существующую формулу оценки давления образования трещины.

**Ключевые слова:** гидро разрыв пласта, напряженно-деформированное состояние, давление образования трещины, эффект обратного напряжения (*backstress*), лабораторные эксперименты, обработка данных.

**Для цитирования:** Новикова Е.В., Тримонова М.А., Турунтаев С.Б., Зенченко Е.В., Зенченко П.Е. Оценка давления образования трещины в лабораторных экспериментах по гидро разрыву пласта // Динамические процессы в геосферах, 2022, т. 14, № 2. С. 40–51. [http://doi.org/10.26006/29490995\\_2022\\_14\\_2\\_40](http://doi.org/10.26006/29490995_2022_14_2_40)

### Введение

Гидро разрыв пласта (ГРП) является одним из распространенных методов исследования напряженно-деформированного состояния разрабатываемого пласта [Ljunggren et al., 2003; Zoback, 2008]. Процесс ГРП заключается в образовании трещины в разрабатываемом нефтеносном пласте путем закачки в него жидкости под давлением через специально пробуренную скважину. Образованная трещина представляет интерес для исследователя, так как позволяет оценить значения главных напряжений, действующих в недеформированном пласте [Zoback et al., 1986].

На инициацию и процесс распространения трещины влияет распределение напряжений в разрабатываемом пласте [Afanasyev et al., 2009; Nagoort et al., 1980; Berchenko, Detournay, 1997]. Поэтому были предложены различные методы, которые позволяли определить значения главных напряжений, действующих в пласте при помощи анализа скважинных данных. Некоторые из методов базируются на анализе функции зависимости давления от времени, полученной со скважины при проведении гидро разрыва пласта. Впервые такой подход был описан в работе [Hubbert, Willis, 1957].

Помимо изначального напряженно-деформированного состояния среды для корректного проведения ГРП и успешной разработки нефте-/газоносного месторождения необходимо знать давление образования трещины [Zhang, Yin, 2017]. Данное давление можно определить как давление, необходимое для

инициирования трещиноватости на известной глубине проведения гидроразрыва пласта. В данной работе рассматривается один из существующих методов теоретической оценки давления образования трещины путем анализа кривых давления, полученных в ходе ГРП. Однако основной задачей данного исследования было оценить влияние некоторых эффектов на величину давления образования трещины.

В частности, авторами работы было показано, что помимо существующего распределения напряжений в пласте на инициацию трещины оказывает значительное влияние обратное напряжение (напряжение *backstress*). Это такое дополнительное напряжение жидкости разрыва, закаченной в пласт и заполнившей пористую среду околоскважинной зоны, которое препятствует распространению трещины [Cleary, 1980; Detournay et al., 1989; Baykin, Golovin, 2016a; 2016b; 2018; Golovin, Baykin, 2018].

В рамках данного исследования проводилась серия лабораторных экспериментов по гидроразрыву пласта. Для моделирования процесса гидроразрыва в лабораторных условиях использовалась экспериментальная установка, которая позволяет создавать условия нагружения модельного образца наиболее приближенные к состоянию реального пласта на глубине разработки. Для достижения максимального подобия в процессе гидроразрыва пласта в лабораторных условиях и реальных моделирующие материалы подбирались согласно критериям подобия. В результате были получены зависимости давления на скважине от времени для каждого эксперимента. Лабораторные данные анализировались с использованием методов обработки скважинных данных.

Для каждого из экспериментов было теоретически вычислено напряжение *backstress* и давление инициации трещины гидроразрыва. Полученные теоретические оценки давления образования трещины сравнивались с величинами давления прорыва трещины, известными из лабораторных экспериментов.

### Теоретическая часть

Областью исследования была прискважинная область, а точнее напряженно-деформированное состояние пласта в этой области в момент образования трещины гидроразрыва. Объектами изучения были скважина и трещина, которая образовалась и распространилась в околоскважинном пространстве за счет нагнетания в скважину жидкости разрыва под давлением. Существует несколько подходов для оценки давления образования трещины ГРП [Zhang, Yin, 2017; Haimson, Fairhurst, 1969; Detournay, Cheng, 1988].

В данном исследовании для вывода формулы теоретической оценки величины давления образования трещины использовалась работа [Haimson, Fairhurst, 1969], которая посвящена выявлению распределения горизонтальных напряжений в пласте на глубине проведения гидроразрыва пласта. Рассматриваемый подход [Haimson, Fairhurst, 1969] основан на классической задаче Кирша для концентрации напряжений вокруг кругового отверстия [Kirsh, 1898]. Такая задача соответствует исследованию концентрации напряжений вокруг вертикальной скважины, вскрывающей пласт, характеризуемый поровым давлением  $P_0$  и горизонтально направленными тектоническими напряжениями,  $S_H$  и  $S_h$  ( $S_H \geq S_h$ ), при этом давление бурового раствора  $P_w$ . Поле напряжений в окрестностях такого отверстия определяется как [Jaeger, Cook, 1969]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_r = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left( 1 - \frac{R^2}{r^2} \right) + (P_w - P_0) \frac{R^2}{r^2} + \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left( 1 - 4 \frac{R^2}{r^2} + 3 \frac{R^4}{r^4} \right) \cos 2\vartheta \\ \sigma_\vartheta = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left( 1 + \frac{R^2}{r^2} \right) - (P_w - P_0) \frac{R^2}{r^2} - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left( 1 + 3 \frac{R^4}{r^4} \right) \cos 2\vartheta \\ \tau_{r\vartheta} = -\frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left( 1 + 2 \frac{R^2}{r^2} - 3 \frac{R^4}{r^4} \right) \sin 2\vartheta \\ \sigma_H = S_H - P_0, \quad \sigma_h = S_h - P_0, \end{array} \right. \quad (1)$$

Здесь  $r$  и  $\vartheta$  – координаты полярной системы координат с началом, совпадающим с центром отверстия, угол  $\vartheta$  отсчитывается от направления на  $S_H$ ;  $R$  – радиус отверстия. Вместо полных напряжений  $S_H$  и  $S_h$  используются эффективные напряжения  $\sigma_H$  и  $\sigma_h$ , являющиеся, в соответствии с теорией Био, разницей между полными напряжениями и поровым давлением [Biot, 1962].

В подходе же [Haimson, Fairhurst, 1969] рассматривается решение задачи Кирша для скважины, для которой выполняется  $r = R$ . Поскольку трещина гидроразрыва развивается перпендикулярно направлению действия минимального главного напряжения, рассматривается угол  $\vartheta = 0^\circ$ . В результате описанных операций можно получить следующие выражения для компонент тензора напряжений:

$$\begin{cases} \sigma_r|_{r=R, \vartheta=0^\circ} = P_w - P_0 \\ \sigma_\vartheta|_{r=R, \vartheta=0^\circ} = 3\sigma_h - \sigma_H - (P_w - P_0) \\ \tau_{r\vartheta}|_{r=R, \vartheta=0^\circ} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\sigma_H = S_H - P_0, \quad \sigma_h = S_h - P_0$$

Развитие трещины нормального отрыва происходит, когда величина главного напряжения, действующего в полярном направлении (кольцевое) превосходит предел прочности породы на одноосное растяжение. Применительно к задаче об инициации трещины гидроразрыва пласта, тот момент, при котором растягивающее кольцевое напряжение достигает предела прочности среды на одноосное растяжение ( $UTS$ ), соответствует образованию трещины, а давление флюида, при котором это происходит, близко к давлению разрыва пласта (рис. 1а). Давление разрыва пласта ( $FBP$ ) тогда можно выразить следующим образом:

$$FBP = 3\sigma_h - \sigma_H + P_0 + UTS \quad (3)$$

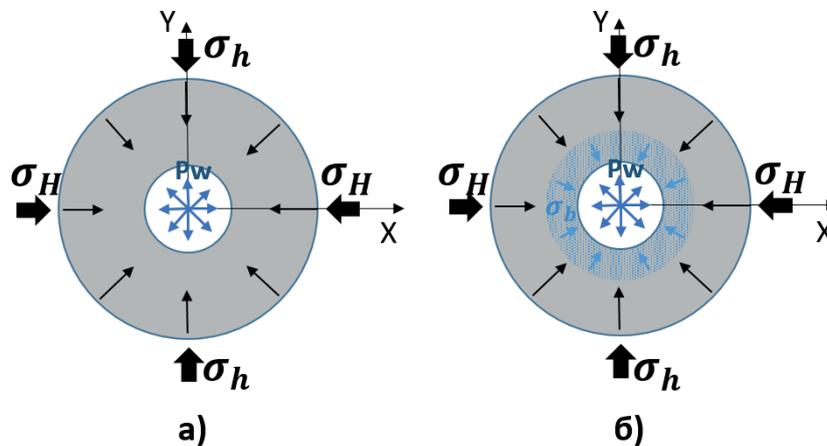


Рис. 1. Схематическое изображение распределения напряжений в пласте со скважиной, в которую производится закачка жидкости

Однако при таком подходе не учитывается изменение свойств среды прискважинной области за счет процесса фильтрации жидкости разрыва из скважины в окружающий ее пласт. За счет заполнения пор среды жидкостью с большей вязкостью, происходит упрочнение материала прискважинной области, что создает дополнительное давление отфильтрованной жидкости на стенки скважины, что в свою очередь приводит к увеличению давления образования трещины гидроразрыва (рис. 1б). Увеличение давления образования трещины связано с тем, что изменяется критерий образования трещины гидроразрыва в среде с отфильтрованной жидкостью разрыва. Таким образом, с учетом дополнительного сжимающего

напряжения, действующего извне на стенки скважины можно переписать выражение для давления образования трещины ( $FBP$ ) следующим образом:

$$FBP = 3\sigma_h - \sigma_H + UTS + \sigma_b \quad (4)$$

Здесь  $\sigma_b$  обозначено обратное напряжение (напряжение *backstress*). Недавние работы, в которых наиболее полно и подробно рассматривается эффект обратного напряжения, принадлежат авторству Байкина и Головина [Baykin, Golovin, 2016a; 2016b; 2018; Golovin, Baykin, 2018]. Также эффекты, вызванные давлением отфильтрованной жидкости в разрабатываемый пласт, упоминаются в работах [Zhang, Yin, 2017; Detournay, Cheng, 1988].

В условиях рассматриваемой задачи, а именно образования трещины в области скважины, в которую производится закачка жидкости разрыва с постоянной скоростью, авторы данной работы предлагают вычислять обратное напряжение в прискважинной области с использованием следующей формулы:

$$\sigma_b = \eta(FBP - P_0), \quad \eta = \frac{\alpha(1 - 2\nu)}{2(1 - \nu)} \quad (5)$$

где  $\eta$  – пороупругий коэффициент.

Для расчета обратного напряжения в данной работе использовалось изменение базовой формулы с коэффициентом удвоения [Cleary, 1980; Detournay et al., 1989]. Данная корректировка применима для проницаемых сред, окруженных непроницаемыми. Для этой серии лабораторных экспериментов использование предложенной формулы является корректным, поскольку модельная установка может быть представлена как слоистая среда, т.е. проницаемый слой, в котором происходит распространение трещины, окруженный непроницаемыми стенками установки.

## Экспериментальная часть

### Лабораторный эксперимент по гидроразрыву пласта

Для моделирования процесса образования трещины в области скважины, в которую производится закачка жидкости, проводилась серия лабораторных экспериментов. Была использована оригинальная установка (рис. 2), которая позволяет моделировать процесс гидроразрыва пласта. Ее конструкция

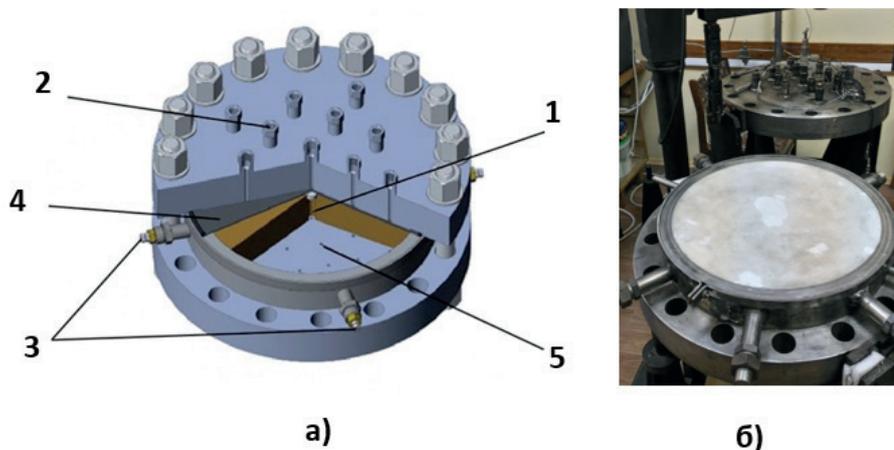


Рис. 2. Схематическое изображение установки (а): 1 – центральная скважина, 2 – вертикальные порты нагружения, 3 – горизонтальные порты нагружения, 4 – резиновая мембрана, 5 – порты для измерения порового давления. Реальное фото установки (б)

представляет собой два стальных диска и широкое кольцо между ними. Нижняя крышка и стенка-кольцо в совокупности образуют рабочую камеру, которая имеет следующие характерные размеры: диаметр – 43 см, высота – 6.6 см. Модельный образец пласта отделен от верхней крышки установки

резиновой мембраной. Между верхней крышкой установки и мембраной имеется зазор, который заполняется водой под постоянным давлением, что позволяет имитировать литостатическое давление в модели пласта. Горизонтальные нагрузки на модельный образец осуществляются при помощи закачки газа или жидкости в плоские медные камеры, расположенные вдоль внутренних поверхностей боковых стенок рабочей камеры. Более подробное описание дано в работе [Trimonova et al., 2017].

Сам лабораторный эксперимент по гидроразрыву пласта проводится в несколько этапов. Первоначально в рабочую камеру установки заливается смесь гипса с цементом. Для достижения максимальной однородности материала заливка модельного материала в рабочую камеру производится медленно, при высыхании усадка материала не наблюдается. Модельный образец формируется в результате высыхания используемого материала, его размеры определяются размерами рабочей камеры экспериментальной установки. Далее полученный пористый образец насыщается раствором гипса в воде путем его закачки в нагнетательную скважину под постоянным давлением. Давления в нагнетательной скважине для каждого эксперимента приведены в табл. 1. После этого установка закрывается, производится нагружение образца.

В дальнейших расчетах использовались величины напряжений, пересчитанные с учетом взаимодействия модельного образца с резиновой мембраной и нижней стальной крышкой установки (табл. 1). Последним этапом эксперимента в заранее заготовленную скважину производится закачка жидкости разрыва, в качестве которой использовалось минеральное масло, с постоянным расходом.

Таблица 1.

**Некоторые характерные параметры лабораторных экспериментов**

Эксперимент	$Q$ , см <sup>3</sup> /с	Время закачки жидкости разрыва до инициации разрыва $\Delta t$ , с	$P_{0^*}$ , атм	Горизонтальное напряжение ( $S_h = S_H$ ), МПа	Вертикальное напряжение $S_v$ , МПа
1	0.17	169	1.00	2.01	6.6
2	0.37	14	2.00	2.01	7.1
3	0.20	26	1.15	1.32	4.8
4	0.20	40	1.00	1.12	4.6
5	0.20	23	1.00	1.29	4.7
6	0.20	28	1.00	1.50	5.1
7	1.65	11	1.10	1.41	5.0

В ходе работы была проведена серия лабораторных экспериментов по гидроразрыву пласта. В результате, были образованы вертикальные (вдоль вертикальной скважины) трещины гидроразрыва. Важно отметить, что все трещины в серии экспериментов проросли на всю высоту модельного образца. Пример кривой зависимости давления от времени для вертикальной трещины представлен на рисунке 3.

Поведение полученных экспериментальных кривых зависимости давления от времени соответствуют классическому характерному поведению кривых давления ГРП, которое было описано в работе [Gaarenstroom et al., 1993].

Также важно отметить, что перед проведением лабораторных экспериментов по гидроразрыву пласта было проведено дополнительное исследование используемых материалов. Моделирующие материал и жидкости выбирались таким образом, чтобы распространение трещины гидроразрыва в условиях лабораторного эксперимента проходило аналогично ее распространению на реальном месторождении. Для достижения подобия процессов в лабораторной и реальных моделях использовались критерии подобия [Trimonova et al., 2017; de Pater et al., 1994].

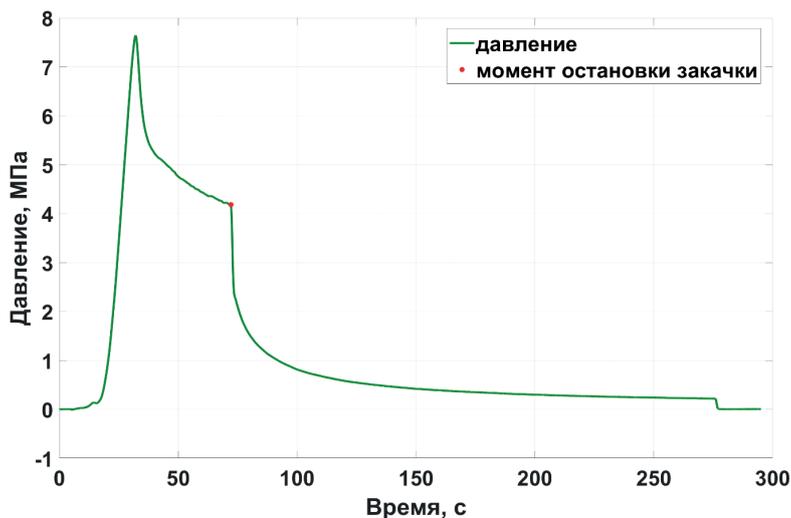


Рис. 3. Пример зависимости давления от времени, полученной в лабораторном эксперименте по созданию вертикальной трещины ГРП

Было выявлено, что подходящей средой для моделирования пласта является смесь гипса с цементом, а жидкостью разрыва – минеральное масло. Численные значения характеристик материалов представлены в табл. 2.

Таблица 2.

**Некоторые свойства моделирующего материала и жидкости, используемых в лабораторных экспериментах**

Вязкость жидкости разрыва, $\mu_p$ [Па·с]	0.12
Вязкость жидкости насыщения, $\mu_n$ ( $\mu_n = \mu_{\text{воды}}$ ) [Па·с]	1.00
Скорость закачки, $q$ [см <sup>3</sup> /с]	0.17–0.37
Модуль Юнга, $E$ [Па]	$4 \times 10^9$
Коэффициент Пуассона, $\nu$	0.25
Проницаемость образцов, $k$ [м <sup>2</sup> ]	$2 \times 10^{-15}$
Пористость образцов, $\phi$	0.4

В ходе работы над предыдущими этапами программы исследований были проведены эксперименты по созданию трещин ГРП, в которых были получены зависимости давления в скважине от времени.

*Определение прочности на одноосное растяжение*

Одной из исследуемых в рамках данной работы характеристик модельного материала была прочность на одноосное растяжение. Данный параметр играет огромную роль в рамках проводившихся исследований, так как критерием образования трещины считался момент, когда локальное напряжение растяжения в области концентраций напряжений превосходит по величине предел прочности материала на растяжение. Поэтому первоначально была проведена дополнительная серия лабораторных испытаний по определению прочности на одноосное растяжение «бразильским» методом. Вид лабораторной установки представлен на рис. 4.

В данной серии экспериментов использовались образцы из модельного материала, диаметр которых составлял 40 мм при длине 42 мм. В процессе испытания на ручном прессе образец помещался между параллельных стальных плит. Прочность на растяжение для такой серии экспериментов рассчитывалась по формуле  $\sigma_p = K \frac{P}{S}$ , где  $K = 2/\pi$  при нагружении плитами,  $P$  – разрушающее усилие,  $S$  – произведение длины образца на его диаметр. Результаты испытаний «бразильским» методом приведены в табл. 3.

Таблица 3.

**Результаты испытаний «бразильским» методом**

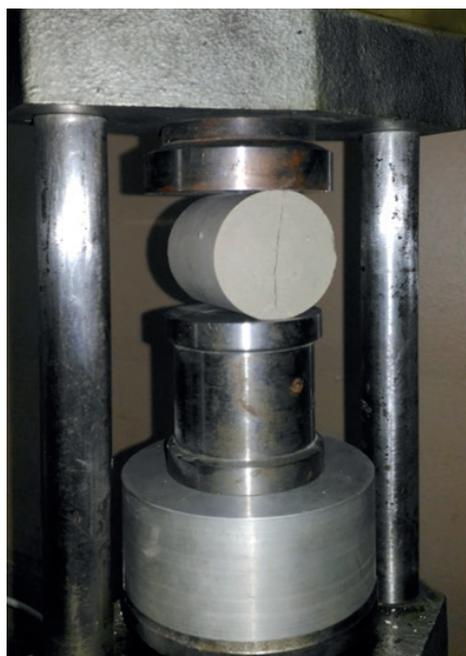


Рис. 4. Разрушенный образец после испытания «бразильским» методом

Номер образца	Диаметр образца $d$ , мм	Высота образца $h$ , мм	Разрушающая сила $P$ , кН	Прочность $UTS$ , МПа
1	40	42.2	1.7	0.6
2	40	42.2	2.6	1.0
3	40	42.2	2.0	0.8
4	40	42.2	2.1	0.8
5	40	42.2	1.8	0.7
6	40	42.2	2.3	0.9

Исходя из полученных вычислений, значение прочности на растяжение можно считать равным 0.8 МПа.

Согласно некоторым источникам [Zhang, Roegiers, 2010; Rutqvist et al., 2000] прочность на растяжение можно определить, зная давление повторного раскрытия трещины ГРП. Для уточнения полученной величины прочности на растяжение была проведена еще одна серия лабораторных экспериментов.

В данном случае все эксперименты проводились в два этапа. Первый представлял собой стандартный лабораторный эксперимент по гидроразрыву пласта, описанный выше. Второй этап заключался в повторном проведении ГРП с целью прорастить уже существующую трещину. Однако после обработки кривых спада давления было обнаружено, что в рамках лабораторных экспериментов прочность материала на одноосное растяжение меняется.

Согласно источникам [Zhang, Roegiers, 2010; Rutqvist et al., 2000; Bredehoeft et al., 1976] при повторном ГРП уже не требуется преодолевать прочность среды на растяжение, потому что трещина уже существует. Поэтому проведение повторного ГРП считается еще одним хорошим методом определения прочности на растяжения путем вычитания из давления образования первичной трещины давление образования повторной трещины. Было проведено три таких двухстадийных эксперимента. Параметры нагружения образцов и результаты вычислений прочности на растяжение приведены в табл. 4.

Таблица 4.

**Результаты определения прочности на растяжения при помощи двухэтапных лабораторных экспериментов по гидроразрыву пласта**

Проращивание горизонтальной трещины	1 этап	давление открытия трещины	6.45	МПа
	2 этап	давление открытия трещины	4.81	МПа
	<i>Прочность на растяжение</i>		<i>1.64</i>	<i>МПа</i>
Проращивание вертикальной трещины	1 этап	давление открытия трещины	8.8	МПа
	2 этап	давление открытия трещины	6.4	МПа
	<i>Прочность на растяжение</i>		<i>2.4</i>	<i>МПа</i>
Проращивание вертикальной трещины	1 этап	давление открытия трещины	7.69	МПа
	2 этап	давление открытия трещины	5.96	МПа
	<i>Прочность на растяжение</i>		<i>1.73</i>	<i>МПа</i>

Скорректированное значение прочности на растяжение – 1.92 МПа. В дальнейших расчетах давления образования трещины мы используем эту величину, потому что она считается более корректной в условиях проведения ГРП.

## Результаты

В ходе данного исследования была проведена серия из семи стандартных одноэтапных лабораторных экспериментов по образованию вертикальной трещины гидроразрыва. Основной целью данной работы было исследование влияния эффекта *backstress* на давление образования трещины в области скважины, в которую производится закачка жидкости разрыва с постоянной скоростью. То есть рассматривалось влияние возникающего дополнительного давления фильтрации в прискважинной области на стенки самой скважины за счет отфильтрованной в процессе закачки жидкости разрыва. Для этого для каждого лабораторного эксперимента были определены экспериментальные давления раскрытия трещины. Эти данные были получены после анализа кривых зависимости давления от времени, которые записывались при помощи датчиков в период проведения экспериментов ГРП. Поведение полученных кривых совпадает с характерным поведением кривых давления, описанных в работе [Gaarenstroom et al., 1993].

Данные кривые имеют характерное поведение. При условии, что закачка жидкости производится с постоянной скоростью, в начале наблюдается линейное возрастание давления с течением времени, которое нарушается при первом появлении утечек, что иногда считается моментом первоначальной инициации трещины. Точка максимального давления на графике соответствует моменту разрыва пласта, то есть образованию трещины. После этого наблюдается снижение давления до величины, называемой давлением распространения трещины. Далее присутствует более быстрый спад давления после остановки закачки жидкости в скважину до давления закрытия трещины.

Таким образом, по кривым давления были определены экспериментальные давления образования трещины. Результаты приведены в табл. 5.

Таблица 5.

**Сравнительная таблица величин давления образования трещины ГРП, полученных экспериментально и вычисленных теоретически**

Эксперимент	$\sigma_b$	<i>FBP</i> (эксперимент)	<i>FBP</i> (теория) ( $UTS = 0.8$ МПа)	<i>FBP</i> (теория) ( $UTS = 1.92$ МПа) С учетом удвоенного $\sigma_b$
1	1.92	8.76	4.27	10.66
2	2.68	12.55	3.77	10.22
3	1.5	7.07	2.82	8.00
4	2.37	10.96	2.24	7.10
5	1.62	7.74	2.58	7.74
6	3.00	13.46	3.20	8.70
7	1.65	7.67	3.02	8.36

Также для каждого эксперимента было оценена величина обратного напряжения, действующего в пласте при помощи формулы (5). Полученные величины приведены в табл. 5. Далее производилась теоретическая оценка давления образования трещины гидроразрыва при помощи формулы, предложенной авторами данной работы, формула (4). Были произведены вычисления давлений образования трещины для каждого эксперимента серии. Полученные результаты представлены в табл. 5.

Из представленных в таблице значений можно видеть, что учет скорректированного значения прочности на одноосное растяжение и удвоенного эффекта обратного напряжения сокращает разницу между теоретическими и экспериментальными значениями давлений раскрытия трещины гидроразрыва.

## Выводы

В результате данного исследования было показано, что учет обратного напряжения, действующего со стороны отфильтрованной в прискважинную область жидкости разрыва, приводит к существенно более корректной оценке давления открытия трещины. Так, при определении давления образования трещины согласно стандартной формуле (3), вычисленные значения были практически одинаковыми для каждого из экспериментов, что не согласовывалось с экспериментальными данными. Тогда как учет обратного напряжения исправил эту картину.

Более наглядно данный вывод можно сделать из рис. 5. Также в ходе работы было выявлено, что надо учитывать возможные различия для величины прочности среды на растяжение, определяемой

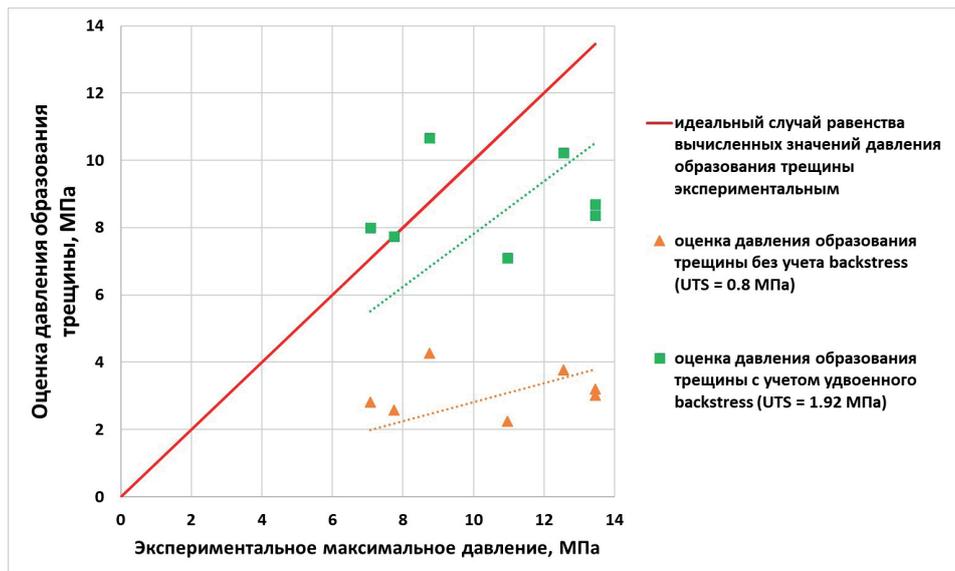


Рис. 5. Сравнительный график экспериментальных и теоретических значений давления образования трещины ГРП

разными методами при разных условиях. В условиях лабораторных экспериментов возможно изменение величины прочности на одноосное растяжение. Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что условия нагружения материала в лабораторной экспериментальной установке по гидроразрыву пласта могут способствовать завышению прочности на одноосное растяжение.

## Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122032900167-1).

## Список литературы

Afanasyev I.S., Nikitin A.N., Latypov I.D., Haidar A.M., Borisov G.A. (2009). Hydrofracturing crack geometry prediction // Oil industry. Vol. 11. P. 62–66.

Baykin A.N., Golovin S.V. (2018). Application of the fully coupled planar 3D poroelastic hydraulic fracturing model to the analysis of the permeability contrast impact on fracture propagation // Rock Mechanics and Rock Engineering. 51:3205–17. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1575-1>.

Baykin A.N., Golovin S.V. (2016a). Modelling of hydraulic fracture propagation in inhomogeneous poroelastic medium. Journal of Physics: Conference Series, vol. 722, IOP Publishing; p. 012003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/722/1/012003>.

Baykin A.N., Golovin S.V. (2016b). Non-symmetry of a hydraulic fracture due to the inhomogeneity of the reservoir. ArXiv Preprint ArXiv:161009471.

*Berchenko I.E., Detournay E.* (1997). Deviation of hydraulic fractures through poroelastic stress changes induced by fluid injection and pumping // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 34:1009–19.

*Biot M.A.* (1962). Mechanics Of Deformation And Acoustic Propagation In Porous Media // *Journal of Applied Physics*. 33:1482–98. <https://doi.org/10.1063/1.1728759>.

*Bredehoeft J.D., Wolff R.G., Keys W.S., Shuter E.* (1976). Hydraulic fracturing to determine the regional in situ stress field, Piceance Basin, Colorado. *Geological Society of America Bulletin*; 87:250–8. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1976\)87<250:HFTDTR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1976)87<250:HFTDTR>2.0.CO;2).

*Cleary M.P.* (1980). Analysis of mechanisms and procedures for producing favourable shapes of hydraulic fractures. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, OnePetro. <https://doi.org/10.2118/9260-MS>.

*Detournay E., Cheng A.H.D.* (1988). Poroelastic response of a borehole in a non-hydrostatic stress field // *Int J Rock Mech Min Sci Geomech*. 25(3):171–82. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(88\)92299-1](https://doi.org/10.1016/0148-9062(88)92299-1).

*Detournay E., Cheng A.H.D., Roegiers J-C., McLennan J.D.* (1989). Poroelasticity considerations in in situ stress determination by hydraulic fracturing // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol. 26, Elsevier. p. 507–13. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(89\)91428-9](https://doi.org/10.1016/0148-9062(89)91428-9).

*de Pater C.J., Cleary M.P., Quinn T.S., Barr D.T., Johnson D.E., Weijers L.* (1994). Experimental verification of dimensional analysis for hydraulic fracturing. *SPE Production & Facilities*; 9:230–8. <https://doi.org/10.2118/24994-PA>.

*Gaarenstroom L., Tromp R.A.J., Jong M., de Brandenburg A.M.* (1993). Overpressures in the Central North Sea: implications for trap integrity and drilling safety. <https://doi.org/10.1144/0041305>.

*Golovin S.V., Baykin A.N.* (2018). Influence of pore pressure on the development of a hydraulic fracture in poroelastic medium // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 108:198–208. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.04.055>.

*Hagoort J., Weatherill B., Settari A.* (1980). Modeling the Propagation of Waterflood-Induced Hydraulic Fractures // *Society of Petroleum Engineers Journal*. 20:293–303. <https://doi.org/10.2118/7412-PA>.

*Haimson B.C., Fairhurst C.* (1969). In-Situ Stress Determination At Great Depth By Means Of Hydraulic Fracturing.

*Hubbert M., Willis D.G.* (1957). Mechanics of Hydraulic Fracturing. *Transactions of the AIME*; 75:239–57. <https://doi.org/10.2118/686-G>.

*Jaeger J.C., Cook N.G.W.* (1969). Fundamentals of rock mechanics. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(74\)92205-0](https://doi.org/10.1016/0148-9062(74)92205-0).

*Kirsch E.G.* (1898). Die Theorie der Elastizitat und die Bedurfnisse der Festigkeitslehre, *Zeitschrift des Verlines Deutscher Ingenieure* // *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure*. Vol. 42. P. 797–807.

*Ljunggren C., Chang Y., Janson T., Christiansson R.* (2003). An overview of rock stress measurement methods // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 40:975–89. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2003.07.003>.

*Rutqvist J., Tsang C-F., Stephansson O.* (2000). Uncertainty in the maximum principal stress estimated from hydraulic fracturing measurements due to the presence of the induced fracture // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 37:107–20. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(99\)00097-0](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(99)00097-0).

*Trimonova M., Baryshnikov N., Zenchenko E., Zenchenko P., Turuntaev S.* (2017). The Study of the Unstable Fracure Propagation in the Injection Well: Numerical and Laboratory Modeling. SPE Russian Petroleum Technology Conference, OnePetro. <https://doi.org/10.2118/187822-MS>.

*Zhang J., Roegiers J.C.* (2010). Discussion on Integrating borehole-breakout dimensions, strength criteria, and leak-off test results, to constrain the state of stress across the Chelungpu Fault, Taiwan // *Tectonophysics*. 492:295–8. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.04.038>.

*Zhang J., Yin S.* (2017). Fracture gradient prediction: an overview and an improved method // *Petroleum Science*. 14:720–30. <https://doi.org/10.1007/s12182-017-0182-1>.

*Zoback M.D, Mastin L.G, Barton C.A.* (1986). In-situ Stress Measurements In Deep Boreholes Using Hydraulic Fracturing, Wellbore Breakouts, And Stonely Wave Polarization. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(87\)90668-1](https://doi.org/10.1016/0148-9062(87)90668-1).

*Zoback M.D.* (2008). Reservoir Geomechanics. Cambridge University Press, Cambridge and New York. 449 p. ISBN-978-0-521-77069-9.

## **ASSESSMENT OF FRACTURE BREAKDOWN PRESSURE IN LABORATORY EXPERIMENTS ON HYDRAULIC FRACTURING**

**E. V. Novikova<sup>1\*</sup>, M. A. Trimonova<sup>1</sup>, S. B. Turuntaev<sup>1</sup>,  
E. V. Zenchenko<sup>1</sup>, P. E. Zenchenko<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*\*E-mail: helenvn97@gmail.com*

Hydraulic fracturing is one of the main ways to increase the flow rate of an oil/gas field. There are methods in which hydraulic fracturing is used to study the stress-strain state of the reservoir being developed. This work was devoted to assessing the correctness of one of these methods, based on known fracture breakdown pressures, using laboratory experiments. Some poroelastic effects are not taken into account in the standard methods of determining the stress-strain state. In the paper, it was proposed to adjust the existing formula for determining the fracture breakdown pressure taking into account the backstress effect. This effect consists in the additional influence of the rupture fluid, which has filtered out from the well into the well surrounding rock mass, on the effective stresses acting on the borehole wall. As part of the work, theoretical estimates of the fracture breakdown pressure were made, which were compared with experimental fracture breakdown pressures. As a result of the data analysis, it was revealed that the critical stress on the wall of the well in laboratory experiments is achieved somewhat later due to the presence of the backstress effect, which made it possible to refine the existing formula for estimating the fracture breakdown pressure.

**Keywords:** hydraulic fracturing, stress-strain state, fracture breakdown pressure, backstress effect, laboratory experiments, data processing.