

УДК 622.831.325.3+622.234.573

**О РАЗВИТИИ ТРЕЩИН ПРИ МНОЖЕСТВЕННОМ НАПРАВЛЕННОМ  
ГИДРОРАЗРЫВЕ ПЛАСТА ХИМИЧЕСКИ АКТИВНЫМИ СОСТАВАМИ**

**И. В. Колыхалов, А. В. Патутин**

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: andrey.patutin@gmail.com,  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Численно исследован процесс развития дополнительной поперечной трещины гидроразрыва между двумя существующими, образованными при множественном направленном гидроразрыве пласта химически активными составами. Рассмотрено влияние основных параметров задачи, таких как величина и ориентация внешнего поля сжатия, степень смыкания трещин направленного гидроразрыва, их размер и величина промежуточного расстояния на отклонение создаваемой трещины от начального направления ее распространения. Полученные результаты предназначены для оптимизации метода локального гидроразрыва парораспределительных и добывающих пластовых скважин при шахтной разработке месторождений тяжелых нефтей.

*Гидроразрыв пласта, трещина гидроразрыва, термошахтная разработка, тяжелые нефти*

Основные мировые запасы разведанных углеводородов сосредоточены в месторождениях тяжелой нефти и природных битумов, однако их разработка требует применения специальных подходов. Высокая вязкость исключает эффективное использование традиционных способов нефтедобычи, коэффициент извлечения нефти (КИН) при этом не превышает 0.15–0.2. Накопленный к настоящему времени опыт промысловых исследований показывает, что наиболее эффективной и промышленно освоенной технологией разработки подобных залежей является тепловое воздействие на продуктивный пласт [1, 2].

Ярегское нефтяное месторождение — одно из уникальных объектов, где в промышленном масштабе используется шахтный способ добычи высоковязкой нефти в сочетании с прогревом пласта. К его основным характеристикам относятся глубина залегания до 250 м, трещиновато-поровый коллектор, представленный кварцевыми песчаниками, вязкость нефти  $12 \dots 16 \cdot 10^3$  мПа·с при начальной температуре пласта 6–8°C, средняя эффективная толщина залежи 26 м. В процессе эксплуатации месторождения установлено, что основными путями фильтрации добываемых и закачиваемых флюидов служат трещины, в то время как запасы нефти содержатся в поровом пространстве. Для таких условий эксплуатации залежи наиболее актуальной задачей становится разработка эффективной термошахтной технологии добычи углеводородов [3].

В настоящее время одной из перспективных систем термошахтной разработки является подземно-поверхностная система, при которой пар закачивается через вертикальные нагнетательные скважины, пробуренные с дневной поверхности, и распределяется по продуктивному пласту с помощью парораспределительных скважин, пробуренных из подземных выработок к

забоям нагнетательных скважин. Разогретая нефть откачивается через подземные добывающие скважины и затем транспортируется на поверхность. Повысить эффективность рассмотренной схемы разработки возможно за счет увеличения продуктивности добывающих и приемистости парораспределительных скважин. Наиболее успешный способ для решения данной задачи — множественный гидроразрыв пласта (ГРП), широко применяемый в добыче сланцевой нефти и газа, а также для интенсификации разработки месторождений легких нефтей.

Особенности шахтной добычи тяжелых углеводородов не позволяют напрямую использовать дорогостоящие технические решения нефтепромыслового гидроразрыва. В частности, подземное оборудование ограничено размерами горных выработок, технологические операции могут проводиться в восстающих необсаженных скважинах. Приемлемыми показателями обладает технология локального гидроразрыва, применяемая в инженерном деле, подземном строительстве, а также в угледобывающей промышленности для разупрочнения труднообрушаемой кровли угольных пластов и для интенсификации их предварительной дегазации [4, 5].

Рассмотрим в шахтных условиях операцию множественного гидроразрыва, выполняемого в парораспределительной пластовой скважине (рис. 1). На начальном этапе с помощью химически активных составов на основе кислот в нефтесодержащей породе создают поперечные трещины первой очереди [6]. В случае кварцевых песчаников применяют плавиковую кислоту  $\text{HF}$  в сочетании с соляной  $\text{HCl}$ , что позволяет растворить связывающий зерна кварца цемент и снизить прочность породы. Поперечное направление трещин обеспечивается касательным нагружением стенок скважины вдоль ее оси в интервале разрыва и импульсной подачей рабочей жидкости [7, 8]. Применение данных технических решений обусловлено необходимостью формирования трещин перпендикулярно оси скважины даже в тех условиях, когда действующие в горном массиве напряжения этому не способствуют.

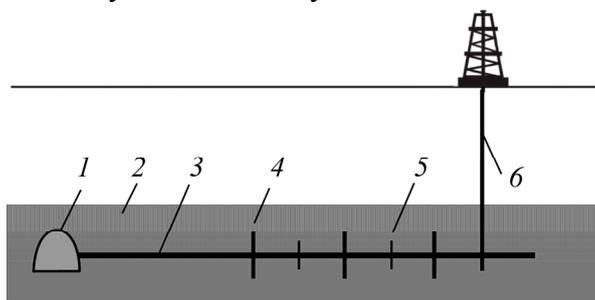


Рис. 1. Схема гидроразрыва парораспределительной пластовой скважины при подземно-поверхностной разработке месторождений вязкой нефти: 1 — подземная выработка; 2 — продуктивный пласт; 3 — парораспределительная пластовая скважина; 4 — трещина гидроразрыва первой очереди; 5 — трещина гидроразрыва второй очереди; 6 — поверхностная нагнетательная скважина

После прекращения роста трещины химически активный состав, закачанный в нее, разупрочняет прилегающие горные породы. При последующем сбросе давления в интервале разрыва происходит выдавливание получившегося шлама в скважину под действием внешних сжимающих напряжений; берега трещины при этом могут находиться в частично раскрытом состоянии.

На втором этапе поперечные трещины создают с помощью стандартных устройств шахтного гидроразрыва, используя в качестве рабочей жидкости воду, что значительно снижает общую стоимость работ. Сформированные ранее разрывы изменяют поле напряжений в окрестности скважины, и растущая трещина меньше отклоняется от первоначально заданной траектории. Таким образом, проведение операции ГРП по двухэтапной технологии позволяет обеспечить равномерное распределение пара по нефтенасыщенному пласту в случае парораспределительных

скважин и повысить продуктивность добывающих скважин. При этом актуальным вопросом остается оценка влияния величины и ориентации внешнего поля сжатия, а также положения формируемой на втором этапе трещины на ее отклонение от начального направления развития.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исследуем процесс распространения поперечной трещины гидроразрыва второй очереди, формируемой между двумя существующими, которые вызывают локальное изменение поля напряжений в окрестности пластовой скважины. Использование химически активного состава и вынос горной породы в скважину на первом этапе ГРП позволяет создать зону разрушения вокруг разрыва, которую будем описывать эллипсом с полуосями  $L$  и  $U_{n0}$ , где  $L$  — полудлина разрыва. При таком предположении система поперечных трещин первой очереди пластовой скважины моделируется дислокационными разрезами, которые имеют нормальные смещения берегов  $U_n(x) = U_{n0}(1 - (x/L)^2)$ , соответствующие их перехлесту в центре  $2U_0 = -2U_{n0}$ , и касательные смещения  $U_s$ .

Рассмотрим создание уплотняющей сетки трещин между уже сформированными на первом этапе. В этом случае дислокационные разрезы вносят дополнительное поле напряжений в общее поле вокруг растущей трещины [9] и граничные условия на берегах растущей трещины, раскрываемой давлением  $p$ , в дополнительных напряжениях имеют следующий вид:  $\sigma_n(s) = -p - \sigma_{n0}(s) - \sigma_{nv}(s)$ ;  $\tau_s(s) = -\tau_{s0}(s) - \tau_{sv}(s)$ , где  $\sigma_{nv}$  и  $\tau_{sv}$  — нормальные и касательные напряжения, вызванные присутствием дислокационных разрезов;  $\sigma_{n0}$ ,  $\tau_{s0}$  — напряжения, вызванные внешним полем сжатия;  $s$  — дуговая координата по длине крыла трещины.

Задача рассматривается в плоской постановке теории упругости. В плоскости, сжатой на бесконечности напряжениями  $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{\min}$ , с главной осью, соответствующей  $\sigma_{\min}$  и направленной под углом  $\alpha$  к оси скважины, находятся на расстоянии  $H$  два перпендикулярных скважине дислокационных разреза длиной  $2L$ . Между ними на расстоянии  $h$  от первой из них расположена инициирующая поперечная трещина длиной  $2l$  (рис. 2). Иницирующая трещина нагружена изнутри давлением  $p$ , на берегах дислокационных разрезов заданы нормальные и касательные смещения  $U_n(x) = U_{n1}(x) = U_{n2}(x)$  и  $U_{s1}(x)$ ,  $U_{s2}(x)$ .

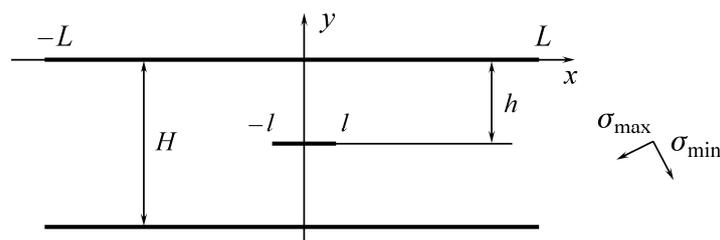


Рис. 2. Начальное расположение гидроразрывов первой очереди и инициирующей поперечной трещины второй очереди

Для нахождения  $U_{s1}(x)$ ,  $U_{s2}(x)$  численно решалась дополнительная задача о нагружении плоскости с двумя параллельными трещинами длинами  $2L$  на расстоянии  $H$  друг от друга (геометрия дополнительной задачи подобна геометрии постановки основной задачи). На берегах трещин задавались граничные условия  $\sigma_n = -p_0 - \sigma_{n0}(x)$ ;  $\tau_s = -\tau_{s0}(x)$ , где  $p_0$  — давление, при котором раскрытие в центре трещины  $2U_0 = 2U_{n0}$ . Результаты решения данной задачи  $U_{s1}(x)$  и  $U_{s2}(x)$  зависят от параметров  $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{\min}$ ,  $\alpha$ ,  $2L$ ,  $H$ , а также упругих констант среды.

Дополнительно рассматривается случай, когда разрушен такой слой породы, что не происходит смыкания берегов трещин, создаваемых на первом этапе. При этом граничные условия на их берегах задавались напряжениями  $\sigma_n = -\sigma_{n0}(s)$ ,  $\tau_s = -\tau_{s0}(x)$ .

**АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ТРАЕКТОРИЙ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИН**

Расчеты развития трещины проводились с помощью численных программ, разработанных по методу разрывных смещений [10]. Использовался пошаговый алгоритм построения траектории растущей трещины [11, 12]. На каждом шаге рассчитывались равновесные давления внутри развивающейся трещины  $p^+$  и  $p^-$  и соответствующие им коэффициенты интенсивности напряжений в вершинах  $K_I^+$ ,  $K_{II}^+$ ,  $K_I^-$ ,  $K_{II}^-$ , знаки (+), (-) относятся к вершинам правого и левого крыла соответственно. Далее выбиралось наименьшее давление из перечисленных, которое определяло, из какой вершины будет происходить рост трещины. При необходимости выбранное давление корректировалось, чтобы выполнялось естественное требование — условие протекания жидкости (положительное раскрытие трещины на всем протяжении растущего крыла). Угол поворота трещины  $\vartheta$  и равновесное давление находились из определяющих соотношений трещины “нормального отрыва” [13]:

$$\vartheta = 2 \arctg \left( \frac{K_I - \sqrt{K_I^2 + 8K_{II}^2}}{4K_{II}} \right), \tag{1}$$

$$\cos(\vartheta/2)^3 = (K_I + 3\sqrt{K_I^2 + 8K_{II}^2}) = 4K_C,$$

где  $K_C$  — вязкость разрушения. Далее длина трещины увеличивалась на заданный отрезок в направлении угла  $\vartheta$ , после чего для измененной формы трещины цикл расчетов повторялся.

**РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ**

Расчеты проводились при следующих параметрах среды:  $\nu = 0.3$ ;  $E = 1.5 \cdot 10^9$  Па;  $K_C = 1$  МПа·м<sup>-1/2</sup>,  $\sigma_{\max} = -10$  МПа,  $\sigma_{\min} = -20$  МПа.

На рис. 3 приведены рассчитанные траектории трещин для различных расстояний  $h$  при фиксированных значениях  $H = 4$  м и  $2L = 4$  м. С учетом симметрии задачи в расчетах использовались величины  $h$  в интервале от  $H/8$  до  $H/2$ . Рисунки между собой различаются разными углами наклона главных сжимающих напряжений в массиве относительно дислокационных разрезов. При  $\alpha = 0$  напряжение  $\sigma_{\min}$  действует параллельно скважине, при  $\alpha = \pi/2$  — перпендикулярно. Для сравнения штриховой линией показаны траектории трещин в поле напряжений, действующих в массиве, без учета влияния трещин гидроразрыва первой очереди.

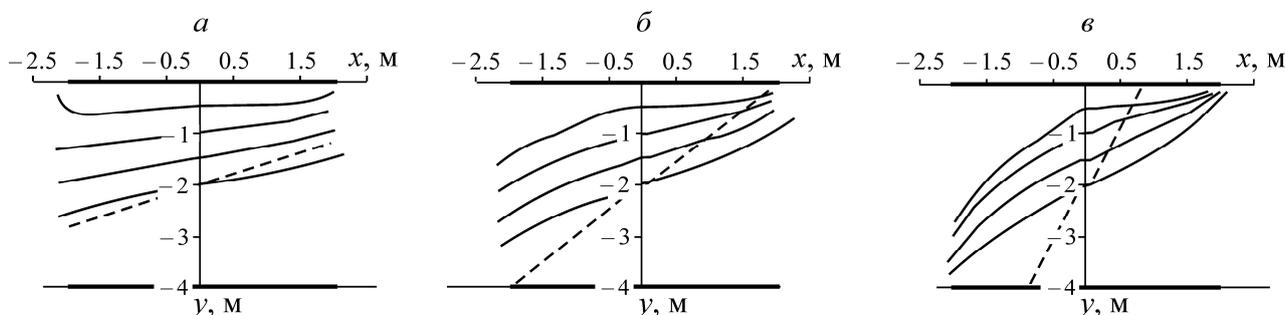


Рис. 3. Траектории трещины для различных расстояний  $h = 0.5 - 2.0$  м и углов наклона  $\alpha$ :  $a$  —  $\alpha = 3\pi/8$ ;  $b$  —  $\alpha = \pi/4$ ;  $v$  —  $\alpha = \pi/8$ ,  $H = 4$  м,  $2L = 4$  м,  $2U_{n0} = 0.02$  м; штрихами обозначена рассчитанная траектория развития одиночной трещины в однородном поле

Видно, что трещины гидроразрыва первой очереди, созданные с использованием химически активных составов, оказывают значительное влияние на траектории развития трещин гидроразрыва второй очереди. При этом левое и правое крылья трещины имеют различные длины и кривизну траекторий, которые в большой степени зависят от  $h$ . Например, при  $\alpha = \pi/8$ ,  $H = 4$  м рассчитанные в интервале  $h = 0.5 - 2$  м трещины гидроразрыва имеют похожие по форме и длине левые крылья. В свою очередь правые крылья значительно отличаются по кривизне друг от друга. Наилучший результат прогрева нефтенасыщенного пласта через парораспределительные скважины и повышения продуктивности добывающих скважин достигается при равномерном распределении трещин. Анализируя полученные формы трещин, можно заключить, что наиболее оптимальным является создание трещин на расстоянии  $h = H/2$ .

На рис. 3 не отображены случаи, когда происходит слияние растущей трещины второй очереди с имеющимися. Данное явление зависит от всех параметров задачи, но основное влияние оказывают: соотношение главных напряжений  $\sigma_{\max} / \sigma_{\min}$ , смещения  $2U_{n0}$ , угол наклона  $\alpha$ , а также  $h$ . Например, при  $\sigma_{\max} = -10$  МПа,  $2U_{n0} = 0.02$  м,  $\sigma_{\min} < -20$  МПа,  $\alpha < \pi/8$ ,  $h < 0.5$  м или при соблюдении хотя бы одного из перечисленных неравенств происходит слияние правого крыла трещины с верхней трещиной первой очереди.

На рис. 4 показано влияние размеров зоны разрушения породы под действием химически активного вещества при образовании трещин гидроразрыва первого этапа. Приведены траектории трещин для различных смещений  $2U_{n0}$ ; штриховая линия соответствует траектории промежуточной трещины в однородном поле напряжений, действующих в массиве на бесконечности. Траектория 7 описывает случай, когда при создании трещин гидроразрыва первой очереди разрушения породы химически активными составами не происходило, т. е.  $2U_{n0} = 0$ , а  $2U_{s0} \neq 0$ . Маркерами обозначена траектория, полученная при условии, что берега дислокационных разрезов — свободные поверхности, т. е. зона разрушения настолько велика, что не происходит смыкания берегов. Данная траектория имеет большее искривление, чем траектории трещин, полученных при  $2U_{n0} = 0.03 \div 0.06$  м, что объясняется влиянием свободных поверхностей на растущую трещину [15]. В данной постановке в процессе расчета развития трещины второй очереди перехлест берегов в центре дислокационных разрезов  $2U_n$  изменяется от 0.065 до 0.11 м.

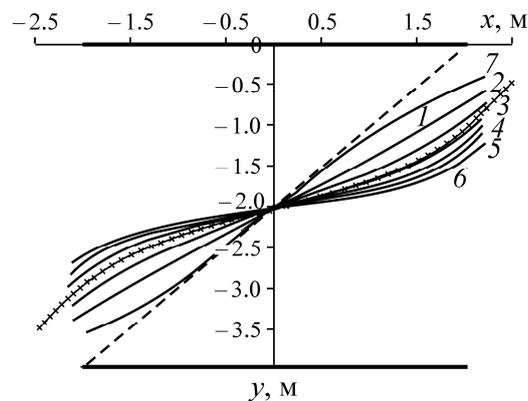


Рис. 4. Траектории трещины для различных смещений  $2U_{n0}$ : кривые 1–6 соответствуют  $2U_{n0} = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \cdot 10^{-2}$  м, кривая 7 —  $2U_{n0} = 0$ ,  $\alpha = \pi/4$ ,  $H = 4$  м,  $2L = 4$  м. Штрихами показана рассчитанная траектория развития трещины в однородном поле. Маркерами обозначена траектория, рассчитанная при условии, что берега трещин первой очереди не смыкаются

Обозначим через  $\Delta$  вертикальное отклонение вершины трещины  $\Delta = -y(x) - h$ , когда ее координата  $x$  достигает величины  $L$ . На рис. 5 приведена зависимость отклонения образованной трещины от угла ориентации главных напряжений  $\alpha$  и от расстояния  $H$ . Штриховая линия на рис. 5а описывает отклонение трещины без учета влияния трещин направленного гидроразрыва первой очереди.

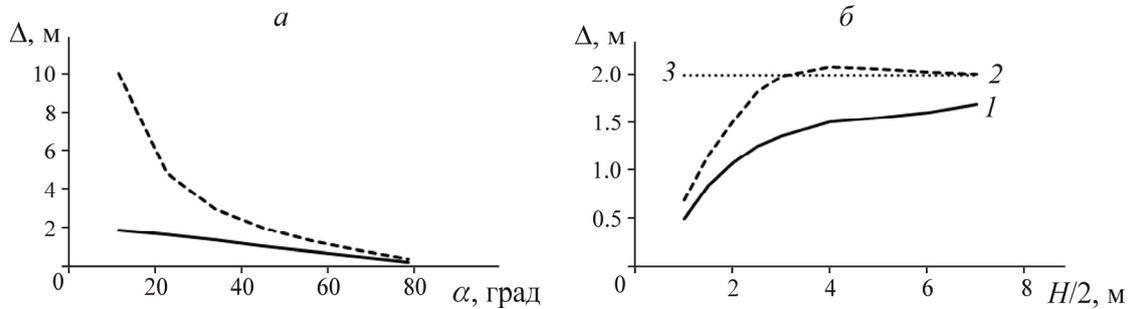


Рис. 5. Зависимость отклонения трещины: а — от ориентации главных напряжений  $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{\min}$ , действующих в массиве ( $h = 2$ ,  $H = 4$  м,  $2L = 4$  м,  $2U_{n0} = 0.02$ ); б — от расстояния между трещинами первой очереди  $H$  ( $h = H/2$ ,  $\alpha = \pi/4$ ,  $2L = 4$  м): 1 —  $2U_{n0} = 0.02$  м; 2 —  $2U_{n0} = 0$ ; 3 — отклонение траектории трещины в однородном поле

Из рис. 5 следует, что наличие трещин первой очереди, перпендикулярных скважине, уменьшает отклонение промежуточных трещин гидроразрыва от нормального к скважине развития. Данное отклонение  $\Delta$  уменьшается с увеличением угла  $\alpha$  и уменьшением расстояния  $H$ . Расчеты при разных значениях  $H$  показали, что влияние имеющихся трещин гидроразрыва на траекторию промежуточных может быть значительным при  $H < 4L$ . Для расстояний  $H > 4L$  отклонения траекторий, созданных между имеющимися, отличаются менее чем на 5% от отклонений, полученных при развитии трещины в однородном поле напряжений. Также отмечено, что неразрушенная трещина гидроразрыва ( $2U_n = 0$ ) первой очереди существенно уменьшает отклонение развивающейся при  $H < 1.5L$ . В целом отклонение  $\Delta$  зависит от всех параметров задачи и может быть оценено для каждого отдельного случая.

**ВЫВОДЫ**

Поэтапное создание системы направленных гидроразрывов в пластовой скважине с формированием редкой сетки сомкнутых разрезов трещин гидроразрыва первой очереди с последующим созданием уплотняющей сетки поперечных трещин второй очереди позволяет существенно уменьшить отклонение последних от плоскости, перпендикулярной скважине.

Исследовано влияние основных параметров на отклонение  $\Delta$  развивающейся трещины второй очереди. К таким параметрам следует отнести: расстояние между трещинами первой очереди  $H$ ; параметр  $h$ , определяющий расположение трещины второй очереди между ранее созданными; соотношение главных напряжений, действующих в массиве  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$ ; угол наклона главных напряжений относительно оси скважины  $\alpha$ ; величину смыкания границ разрушенного материала в трещине первой очереди  $2U_{n0}$ . Проведенные расчеты показали, что отклонение  $\Delta$  развивающейся трещины второй очереди уменьшается с ростом  $2U_{n0}$ , уменьшением расстояния  $H$  и увеличением отклонения главной оси максимального сжатия внешнего поля напряжений от оси скважины  $\alpha$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Коноплев Ю. П., Питиримов В. В., Табаков В. П. и др.** Термошахтная разработка месторождений с тяжелыми нефтями и природными битумами (на примере Ярегского нефтяного месторождения) // ГИАБ. — 2005. — № 3. — С. 246 – 253.
2. **Коноплев Ю. П., Буслаев В. Ф., Ягубов З. Х., Цхадая Н. Д.** Термошахтная разработка нефтяных месторождений. — М.: ООО “Недра-Бизнесцентр”, 2006. — 288 с.
3. **Морозюк О. А.** Пути повышения эффективности термошахтной разработки залежей аномально вязкой нефти (на примере Ярегского месторождения): автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Ухта: УГТУ, 2011. — 24 с.
4. **Леконцев Ю. М., Сажин П. В.** Технология направленного гидроразрыва пород для управления труднообрушающимися кровлями в очистных забоях и дегазации угольных пластов // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 137 – 142.
5. **Курленя М. В., Алтунина Л. К., Кувшинов В. А., Патутин А. В., Сердюков С. В.** Пеногель для гидроразрыва газоносных угольных пластов в шахтных условиях // ФТПРПИ. — 2012. — № 6. — С. 3 – 11.
6. **Al-Harthy S., Bustos O. A., Samuel M., Still J., Fuller M. J., Hamzah N. E., Pudín bin Ismail M. I., Parapat A.** Options for High-Temperature Well Stimulation, *Oilfield Review*, Winter 2008/2009, No. 4. — P. 52 – 62.
7. **Шилова Т. В., Сердюков С. В.** Защита действующих дегазационных скважин от поступления воздуха из горных выработок через вмещающие породы // ФТПРПИ. — 2015. — № 5. — С. 179 – 186.
8. **Азаров А. В., Курленя М. В., Патутин А. В., Сердюков С. В.** Математическое моделирование напряженного состояния пород при касательной и нормальной нагрузках стенок скважины в интервале гидроразрыва // ФТПРПИ. — 2015. — № 6. — С. 3 – 10.
9. **Салимов О. В., Насыбуллин А. В., Салимов В. Г.** Влияние множественных трещин в дальней зоне на успешность операций гидроразрыва пластов // Нефтепромысловое дело. — 2010. — № 10. — С. 24 – 27.
10. **Крауч С., Старфилд А.** Методы граничных элементов в механике твердого тела. — М: Мир, 1987. — 328 с.
11. **Шер Е. Н., Колыхалов И. В.** Особенности последовательного развития близко расположенных трещин гидроразрыва // ФТПРПИ. — 2011. — № 6. — С. 43 – 53.
12. **Шер Е. Н., Колыхалов И. В.** Определение форм трещин при поинтервальном гидроразрыве продуктивного пласта // ФТПРПИ. — 2014. — № 6. — С. 70 – 78.
13. **Черепанов Г. П.** Механика хрупкого разрушения. — М.: Наука, 1974. — 640 с.
14. **Алексеева Т. Е., Мартынюк П. А.** Траектории выхода трещин на свободную поверхность // ФТПРПИ. — 1991. — № 2. — С. 15 – 25.

*Поступила в редакцию 18/III 2016*