

НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

УДК 622.276.66:622.234.573

ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МНОЖЕСТВЕННОГО ЛОКАЛЬНОГО ГИДРОРАЗРЫВА ПОРОДНОГО МАССИВА В НЕОБСАЖЕННЫХ СКВАЖИНАХ

С. В. Сердюков, Н. В. Дегтярева, А. В. Патутин, Т. В. Шилова

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: ss3032@yandex.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Технический комплекс предназначен для проведения множественного гидроразрыва в необсаженных протяженных скважинах любой ориентации и создания в мягких и средней твердости породах поперечных трещин радиусом до 5 м. Скважинное устройство оснащено встроенной системой передвижения. Оборудование позволяет выполнять гидроразрыв химически активными рабочими жидкостями, которые образуются в интервале разрыва при смешивании двух компонентов, нагнетаемых насосной станцией по отдельным рукавам высокого давления.

Множественный гидроразрыв, необсаженная скважина, скважинное оборудование, встроенная система доставки, анкерная система формирования поперечных трещин, двухкомпонентная рабочая жидкость гидроразрыва

Основным препятствием к внедрению множественного направленного гидроразрыва на шахтах служит отсутствие эффективных технических решений, работоспособных в протяженных необсаженных скважинах произвольной ориентации, пробуренных из горных выработок. Это сдерживает применение данного метода для повышения приемистости и продуктивности скважин при термощахтной добыче тяжелой нефти [1], подземном выщелачивании металлов [2], предварительной дегазации угольных пластов [3, 4]. Особенностью существующих систем разработки таких объектов является близкое расположение скважин (10–25 м) [5, 6], длина которых может достигать одного километра. Для интенсификации дренирования породного массива такими скважинами достаточно создать в них трещины радиусом 5–12 м. Это существенно меньше, чем размеры технологических разрывов при добыче нефти и сланцевого газа, составляющие сотни метров [7]. Высокопроизводительное насосное оборудование для проведения локальных гидроразрывов не требуется. В ряде случаев можно обойтись и более короткими трещинами без их раскрепления пропантом, вместо которого использовать химически активные жидкости гидроразрыва и импульсные режимы их закачки, частично разрушающие породу. Достаточно создать дренажные каналы, выходящие за пределы призабойной зоны пониженной проницаемости, образовавшейся, например, вследствие фильтрации бурового раствора

в породе. При направленном бурении подземных скважин глубина кольматации низкопроницаемых пластов составляет менее одного метра. Локальный гидроразрыв в таких условиях направлен главным образом на улучшение гидродинамической связи скважин с пластом.

Обработка протяженной скважины насосным оборудованием малой производительности предполагает проведение множества интервальных гидроразрывов. Использование буровых труб и станков для перемещения устройства разрыва вдоль ствола ведет к снижению экономических показателей работ. Более эффективное решение — самоходные скважинные системы, оснащенные гибкими рукавами высокого давления для подачи рабочей жидкости. Рассмотрены вопросы создания специализированного шахтного комплекса локального гидроразрыва с интегрированной системой доставки, приведены основные технические решения, реализованные в экспериментальном образце оборудования.

СТРУКТУРА ТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Пневматическая и гидравлическая схемы разработанного шахтного комплекса направленного поинтервального гидроразрыва приведены на рис. 1. Он состоит из устройства разрыва с интегрированной системой доставки, насосной станции, системы управления и соединительных рукавов высокого давления Л1–Л2. Станция содержит два насоса высокого давления с независимыми пневматическими приводами и обеспечивает раздельную подачу компонентов рабочей жидкости в интервал разрыва с регулируемым расходом. Система управления включает подачу жидкости в рукава Л1–Л2 или ее слив из них в баки БК1–БК2. Последовательность срабатывания распределителей Р1–Р2 задается контроллером, на вход которого поступает информация о движении скважинного устройства с датчика длины троса PL. Если сигнала о перемещении устройства на заданный шаг вглубь скважины нет или оно достигло нужного интервала скважины, контроллер останавливает выполнение транспортного режима и извещает об этом оператора. При гидроразрыве оба распределителя Р1–Р2 включены на подачу жидкости в Л1–Л2. Контроль формирования трещины осуществляется по показаниям выходных манометров насосной станции.

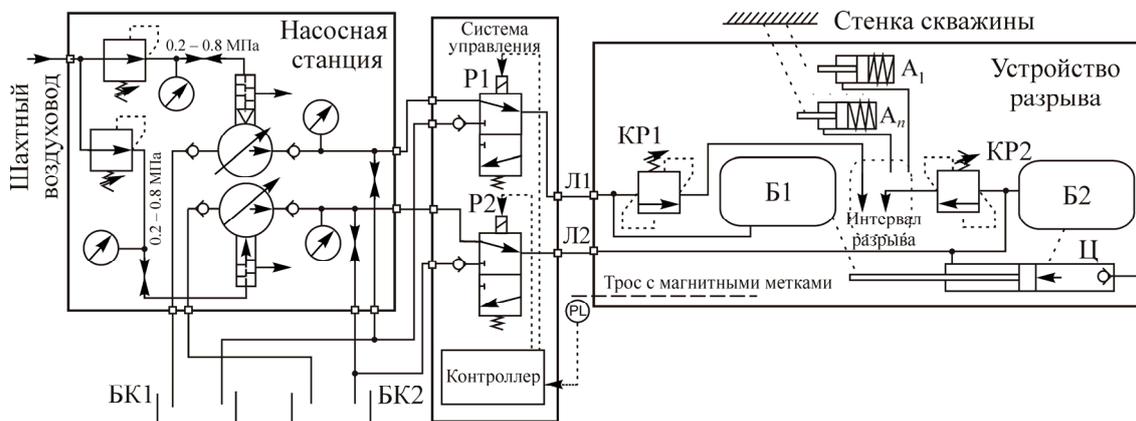


Рис. 1. Пневматическая и гидравлическая схемы шахтного комплекса направленного поинтервального гидроразрыва: БК — баки с компонентами рабочей жидкости; КР — подпорные клапаны; Ц — гидроцилиндр; А — анкеры; Б — пакеры; Р — распределители с электромагнитным управлением; PL — счетчик длины троса; Л1, Л2 — скважинные гидравлические линии

Скважинное устройство состоит из герметизатора с входным узлом 1 и верхним пакером 2, интегратора 3 со встроенным инициатором поперечного разрыва и транспортного модуля 4 (рис. 2). Устройство предназначено для проведения гидроразрыва двухкомпонентными рабочими жидкостями, смешивание компонент которых происходит в межпакерном интервале.

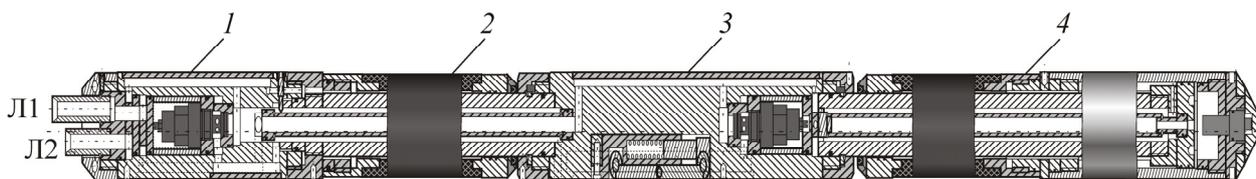


Рис. 2. Общий вид скважинного устройства локального направленного гидроразрыва: Л1, Л2 — входы для подсоединения рукавов высокого давления (РВД); 1 — входной узел; 2 — верхний пакер; 3 — интегратор; 4 — транспортный модуль

Входной узел 1 оборудован встроенным подпорным клапаном и двумя входными патрубками для подсоединения скважинных гидравлических линий рукавов высокого давления Л1 – Л2 с диаметром проходного сечения 8 мм (рис. 3).

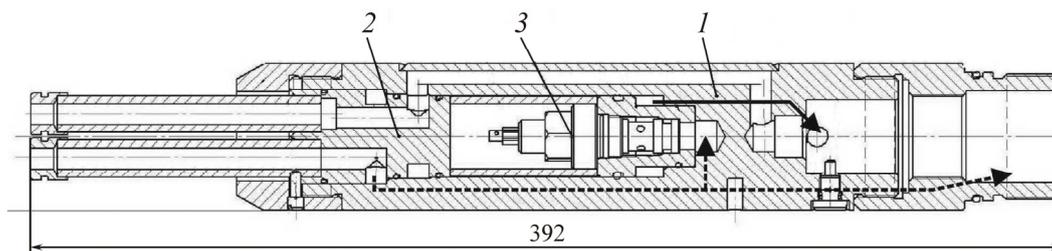


Рис. 3. Общий вид входного узла: 1 — корпус; 2 — поршень; 3 — подпорный клапан

Один из компонентов рабочей жидкости поступает в транспортный модуль по линии Л1 и через клапан интегратора в интервал разрыва. Второй компонент подается туда по линии Л2 через клапан входного узла (рис. 3, сплошная линия), а также напрямую в верхний пакер (рис. 3, пунктирная линия). Подача жидкости в интервал разрыва через подпорные клапаны позволяет не полностью сбрасывать давление в РВД между технологическими операциями, что экономит время на их выполнение.

Транспортный модуль осуществляет передвижение устройства вглубь скважины. Известны два способа доставки оборудования в необсаженных пологих и наклонных скважинах — это досылка устройств с помощью колонны штанг или труб и применение самостоятельно передвигающихся тягловых систем. Первый способ удобен при работах вблизи устья скважин, но на удалении более 30–50 м вес колонны возрастает настолько, что необходимы специальные досылочные механизмы. Когда трубы используются и для монтажных операций и для закачки жидкости под высоким давлением, надежность технического комплекса гидроразрыва снижается из-за большого числа герметичных соединений. Длительность одного интервального гидроразрыва со вспомогательными операциями может достигать десятков минут, а плотность таких разрывов доходить до нескольких сотен на одну скважину. Применение в качестве досылочного устройства станка направленного бурения ведет к длительному нецелевому использованию, снижает эффективность его эксплуатации и многократно увеличивает стоимость работ.

Более перспективным способом доставки легкого технологического оборудования и приборов в пологих и восстающих скважинах являются самоходные тягловые устройства. Для транспортирования технических средств локального гидроразрыва наиболее подходит пошаговое перемещение с помощью пневмогидравлической силовой передачи. Этот способ и реализован в разработанном устройстве. Транспортный модуль состоит из нижнего пакера и гидравлического цилиндра, плунжер которого соединен силовым штоком с интегратором, а корпус — с пакером (см. рис. 2). Конец пакерной оболочки со стороны интервала разрыва может герметично смещаться вдоль полированной части штока. При подаче рабочей жидкости в транспортный модуль пакер надувается

и входит в контакт со стенками скважины. Давление при этом устанавливают ниже срабатывания подпорных клапанов. Под его действием плунжер гидравлического цилиндра вместе со штоком смещается вглубь скважины и тянет за собой интегратор, герметизатор и рукава высокого давления Л1–Л2. Контроль движения осуществляется на устье скважины по показаниям датчика (счетчика) длины троса, который используется для извлечения устройства разрыва из скважины. На следующем шаге рабочую жидкость подают в герметизатор, а в транспортном модуле давление сбрасывают. При этом в сцепление со стенками скважины вступает верхний пакер, а транспортный модуль перемещается вглубь скважины под действием газовой пружины. Ею служит полость гидроцилиндра, заполненная сжатым азотом (см. рис. 1, 2). Переключение подачи жидкости с одного пакера на другой выполняется с задержкой слива так, чтобы исключить одновременную потерю ими контакта со стенкой скважины. Транспортный модуль развивает тягу до 7.5 кН. Этого достаточно для перемещения устройства разрыва вместе с тросом и двумя рукавами высокого давления в скважине длиной до 1000 м любой ориентации, в том числе пробуренной вверх.

Совмещение в одном элементе функций якоря и пакера существенно упрощает конструкцию скважинного оборудования, отличие которого от стандартного устройства гидроразрыва сводится к гидроцилиндру, регулирующему межпакерное расстояние. Преимуществом встроенного механизма доставки является возможность использования для его энергообеспечения и управления тех же рукавов высокого давления, что и для выполнения разрыва. Управление пошаговым передвижением и его блокирование в аварийных ситуациях выполняет электронный контроллер, оснащенный счетчиком расстояния, пройденного в скважине. Это придает оборудованию черты роботизированной системы, что представляется перспективным направлением развития шахтной техники.

Интегратор состоит из корпуса 1 с двумя каналами подачи компонентов рабочей жидкости гидроразрыва в межпакерный интервал, клапана 3, установленного в гидравлической линии транспортного модуля, и системы формирования трещины поперек скважины в легкоразрушаемых горных породах 2 (рис. 4). Стрелками на рис. 4 показаны пути подачи компонентов рабочей жидкости в интервал разрыва, пунктиром — с выхода клапана 3. Сопла подачи компонентов расположены рядом друг с другом под небольшим углом для лучшего перемешивания.

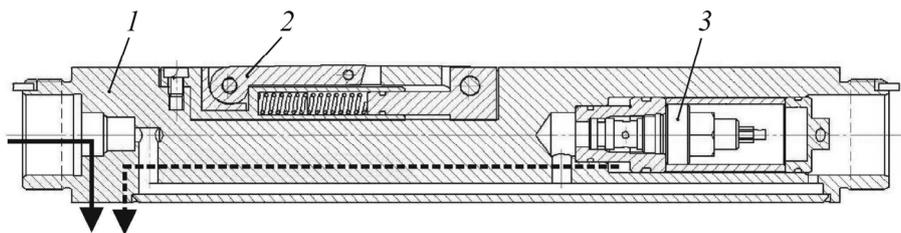


Рис. 4. Общий вид интегратора: 1 — корпус; 2 — модуль формирователя трещины поперек скважины; 3 — клапан

СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕЩИНЫ

Система формирования трещины поперек скважины разработана в двух модификациях — для мягких пород (см. рис. 2) и пород средней твердости (твердость по штампу меньше 4 ГПа) [8]. В обеих применены одинаковые модули-инденторы, приводимые в действие давлением жидкости в интервале разрыва. Устройство для разрыва мягких горных пород содержит от 3 до 6 таких модулей, установленных в корпусе интегратора и распределенных равномерно по контуру скважины. В устройстве для пород средней твердости есть дополнительные модули, которые размещены в подвижном фланце нижнего пакера. Конструкция модуля-индентора показана на рис. 5а. Он состоит из корпуса 1, содержащего цилиндрическую полость, изолированную от

межпакерного интервала. В нее вставлен подпружиненный шток 5. К этому штоку и корпусу анкера прикреплен механизм из рычагов 2, 4, соединенных между собой. Один из них оснащен твердосплавным индентором 6.

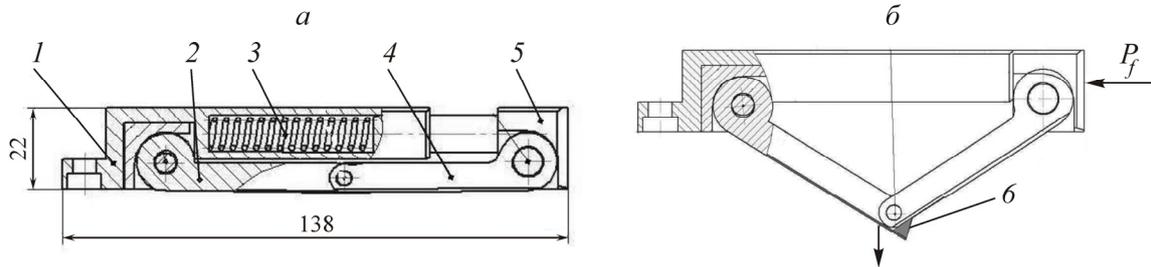


Рис. 5. Модуль-индентор в транспортном (а) и рабочем (б) положениях: 1 — корпус; 2, 4 — рычаги; 3 — пружина; 5 — шток; 6 — индентор; P_f — давление рабочей жидкости в интервале разрыва

Модуль работает следующим образом. В исходном состоянии давление в цилиндрической полости равно атмосферному. При подаче в межпакерный интервал жидкости под давлением P_f шток 5 входит в корпус 1, рычажный механизм складывается до упора индентора 6 в стенки скважины (рис. 5б). При дальнейшем росте давления он вдавливается в горную породу и раскрывает или создает на стенке скважины краевую трещину (рис. 6), которая заполняется жидкостью гидроразрыва.

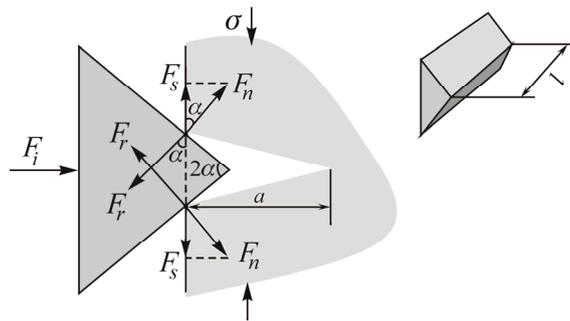


Рис. 6. Раскрытие краевой трещины на стенке скважины при вдавливании клина (индентора): F_r — реакция опоры ($|F_r| = |F_n|$); F_i — сила вдавливания ($|F_i| = 2|F_r| \sin \alpha$); a — глубина краевой трещины; 2α — угол при вершине клина; l — его длина

Для анализа системы формирования трещины поперек скважины воспользуемся известными коэффициентами интенсивности напряжений K_I для полуплоскости с краевой туннельной трещиной, нагруженной сосредоточенными силами F_s вдоль выхода ее берегов на границу среды, внутренним давлением рабочей жидкости гидроразрыва P_f и сжимающими напряжениями σ , действующими по нормали к поверхности трещины [9]:

$$K_I^{(1)} = 0.8256 \frac{F_s}{l} \sqrt{\pi/a}, \tag{1}$$

$$K_I^{(2)} = 1.1215(P_f - \sigma)\sqrt{\pi a}. \tag{2}$$

При вдавливании клина индентора в краевую трещину с силой F_i имеем $F_s = F_i/2\text{tg} \alpha$ (рис. 6). Если на индентор дополнительно действует касательная нагрузка F_t , приложенная вдоль оси скважины, то $F_s = F_t + (F_i/2\text{tg} \alpha)$. Первый случай соответствует системе формирования попе-

речной трещины в мягких породах, второй — ее модификации для направленного гидроразрыва пород средней твердости. В разработанном устройстве $F_t = \pi(R^2 - r^2)P$, где R — радиус скважины, r — радиус силового штока, соединяющего плунжер гидроцилиндра транспортного модуля с интегратором (см. рис. 2).

Синхронное действие нескольких инденторов, равномерно расположенных по окружности скважины радиусом R , снижает сопротивление разрыву пород поперек скважины аналогично строчке трещин в сравнении с одиночной трещиной [10]. Приближенное значение коэффициента, повышающего K_I при группировании инденторов, дается выражением $K = \sqrt{(4R/nl)\text{tg}(nl/4R)}$, где n — их количество [11]. Для практически достижимых значений $n = 3 - 6$, $l = 10 - 20$ мм при $2R = 76 - 105$ мм влияние группирования инденторов на начальную стадию разрыва незначительно и не превышает нескольких процентов. Более важен эффект улучшения направленности магистральной трещины, получаемой слиянием нескольких разрывов, создаваемых в заданной плоскости. Формированию поперечной трещины разработанным устройством способствует и тот факт, что для получения более высоких дебитов пологие дренажные скважины обычно бурят поперек доминирующей системы вертикальной трещиноватости пород [12].

Основные характеристики экспериментального образца технического комплекса шахтного гидроразрыва, разработанного для скважин разных диаметров, приведены ниже:

Диаметр скважины.....	70 – 84 мм; 85 – 110мм
Ориентация скважины.....	Любая
Длина скважины.....	До 1000 м
Длина устройства разрыва.....	3200 мм
Диаметр устройства разрыва.....	60 мм — для скважин диаметром 70 – 84 мм; 75 мм — для скважин диаметром 85 – 110 мм;
Длина интервала разрыва.....	300 – 800 мм
Число скважинных гидравлических линий (РВД).....	2
Диаметр проходного сечения РВД.....	8 мм
Масса устройства разрыва, не более.....	20 кг
Масса скважинного оборудования, включая соединительные линии и трос, не более.....	460 кг (580 кг при заполнении РВД рабочей жидкостью)
Давление разрыва, не более.....	35 МПа
Максимальный темп подачи жидкости насосной станцией (на один канал), не более.....	5 л/мин
Рабочая жидкость гидроразрыва.....	Однокомпонентная (вода, сжиженные углеводороды, растворители) или двухкомпонентная (кислотные составы, азотогенерирующие составы)
Радиус трещин гидроразрыва.....	До 5 м
Расстояние между трещинами по столу скважины...	От 2 м
Скорость перемещения устройства в скважине.....	До 100 м/ч

В процессе обработки скважины устройство гидроразрыва последовательно перемещают по ее стволу и создают систему поперечных трещин радиусом до 5 м, расположенных на расстоянии 2 м и более друг от друга. Относительно небольшие размеры устройства позволяют проводить гидроразрыв в искривленных скважинах, а надувные пакеры длиной 500–1000 мм способствуют надежной герметизации интервала разрыва. Разработанный комплекс позволяет проводить гидроразрыв химически активными рабочими жидкостями, которые образуются в межпакерном интервале при смешивании двух компонентов, нагнетаемых по отдельным рукавам высокого давления. Вместе со

встроенной системой перемещения в скважине это обеспечивает широкие функциональные возможности разработанного оборудования при выполнении множественного локального гидроразрыва породного массива в протяженных необсаженных скважинах направленного бурения.

ВЫВОДЫ

Разработанный технический комплекс обеспечивает проведение множественного направленного гидроразрыва в необсаженных скважинах любой ориентации длиной до 1000 м и создание в мягких и средней твердости породах поперечных трещин радиусом до 5 м.

Отличительной особенностью оборудования является возможность выполнения гидроразрыва химически активными рабочими жидкостями, образующимися в межпакерном интервале при смешивании двух компонентов, нагнетаемых по отдельным линиям.

Скважинное устройство оснащено встроенной системой передвижения по стволу и гибкими рукавами давления для подачи рабочей жидкости в пакеры и интервал разрыва. Это гарантирует высокую технологичность и оперативность работ в шахтных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сердюков С. В., Курленя М. В. Применение локального гидроразрыва для интенсификации термогравитационного дренирования пласта // Интерэкспо Гео-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология»: сб. материалов в 4 т. — Новосибирск: СГГА, 2016. — Т. 4. — С. 8–13.
2. Воробьев А. Е. Шахтное подземное выщелачивание марганца из скальных руд // ГИАБ. — 2000. — № 5. — С. 36–39.
3. Mills K., Jeffrey R., Black D. et al. Developing methods for placing sand-propped hydraulic fractures for gas drainage in the Bulli Seam, In: Underground Coal Operators' Conference, July 7–8, 2006, Wollongong, Australia, 2006. — P. 190–199.
4. Курленя М. В., Алтунина Л. К., Кувшинов В. А., Патутин А. В., Сердюков С. В. Пенгель для гидроразрыва газоносных угольных пластов в шахтных условиях // ФТПРПИ. — 2012. — № 6. — С. 3–11.
5. Горная энциклопедия. Дегазация [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.mining-enc.ru/d/degazaciya/>.
6. Коноплев Ю. П., Питиримов В. В., Табаков В. П., Тюнькин Б. А. Термошахтная разработка месторождений с тяжелыми нефтями и природными битумами (на примере Ярегского нефтяного месторождения) // ГИАБ. — 2005. — № 3. — С. 246–253.
7. Gandossi L., Von Estorff U. An overview of hydraulic fracturing and other formation stimulation technologies for shale gas production. Scientific and Technical Research Reports, Publications Office of the European Union: Joint Research Centre of the European Commission, 2015. — DOI:10.2790/379646.
8. Характеристики горных пород, определенные по штампу [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://studopedia.ru/6_76798_harakteristiki-gornih-porod-opredelennye-po-shtampu.html.
9. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: в 2-х т. — Т. 1; пер. с англ. / под ред. Ю. Мураками. — М.: Мир, 1990. — 448 с.
10. Парис П., Си Дж. Анализ напряженного состояния около трещины // Прикл. вопр. вязкости разрушения. — М.: Мир, 1968. — 552 с.
11. Курленя М. В., Зворыгин Л. В., Сердюков С. В. Управление продольным гидроразрывом скважин // ФТПРПИ. — 1999. — №5. — С. 3–12.
12. Пат. 2439298 РФ. МПК Е 21 В 43/16. Способ разработки залежи нефти массивного типа с послойной неоднородностью / Р. С. Хисамов, Р. Г. Рамазанов, И. М. Бакиров, З. С. Идиятуллина, В. Б. Оснос. — № 2010129895/03; заявл. 16.07.10; опубл. 10.01.12, Бюл. № 1.

Поступила в редакцию 17/X 2016