ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРИТОКА НЕФТИ В СКВАЖИНАХ

APPLICATION OF HYDRAULIC FRACTURING FOR INTENSIFYING OIL FLOW IN WELLS

Н. Р. Яркеева**Natalia R. Yarkeeva**

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

А. М. Хазиев**Almaz M. Khaziev**

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

На сегодняшний день большая часть запасов нефти и газа является трудноизвлекаемой, то есть находится в залежах, приуроченных к низкопроницаемым и слабодренуемым коллекторам. Одним из методов интенсификации добычи, позволяющих сделать извлечение нефти из подобных залежей рентабельной, является гидравлический разрыв пласта (ГРП).

Метод был открыт еще в середине прошлого века, но его актуальность в наши дни только возрастает. В Соединенных Штатах Америки применение ГРП связано с началом эксплуатации залежей сланцевых пород, а в России — с увеличением доли трудноизвлекаемой нефти. Технология гидроразрыва пласта заключается в закачке в добывающую скважину жидкости разрыва под давлением, превышающим давление разрыва пласта. В результате в призабойной зоне образуются трещины, которые являются дополнительными каналами для фильтрации углеводородов и увеличивают общую проницаемость пласта. Во избежание смыкания трещин под действием горного давления в жидкость разрыва добавляют проппант — гранулообразный материал, закрепляющий трещины. В нее также могут добавляться различные химические реагенты для увеличения эффективности операции. В статье представлены таблицы с указанием различных жидкостей разрыва и химических реагентов, применяемых при ГРП, их составы и области применения. Рассмотрены различия между высоко- и низкопроницаемыми коллекторами при определении дебита скважины и накопленной добычи.

Важным критерием успеха гидроразрыва пласта является выбор скважины. Наилучшие пласты для данной операции содержат значительные геологические объемы нефти и газа, но требуют увеличения коэффициента продуктивности скважин.

Today, most of the oil and gas reserves are difficult to recover, due to the fact that they are located in deposits of low-permeability and low-drained reservoirs. One of the enhanced recovery method for making oil extraction from such deposits profitable, is hydraulic fracturing (HF). The method was discovered in the middle of the last century, but its relevance nowadays only increases. In the United States of America, the use of hydraulic fracturing is associated with the start of exploitation of shale deposits, and in Russia with an increase in the proportion of hard-to-recover oil.

The technology of hydraulic fracturing consists in injecting a fracturing fluid into the production well under pressure exceeding the fracturing

Ключевые слова

гидравлический разрыв пласта,
выбор жидкости разрыва,
выбор скважины для ГРП,
опыт применения ГРП,
виды проппантов

Key words

hydraulic fracturing,
selection of fracturing fluid,
selection of a well for fracturing,
experience of hydraulic fracturing
application, types of proppants

pressure. As a result, cracks are formed in the bottomhole zone, which are additional channels for filtering hydrocarbons and increase the overall permeability of the formation.

In order to avoid the closure of cracks under the action of rock pressure, a proppant is added to the fracturing fluid — a granular material fixing the cracks. Various chemical reagents can also be added to increase the efficiency of the operation. The article presents tables with indication of various fracturing fluids and chemical reagents used during hydraulic fracturing, their compositions and areas of application. The differences between high- and low-permeable reservoirs in determining the flow rate and cumulative production are considered.

An important criterion for the success of hydraulic fracturing is the selection of a well. The best layers for this operation contain significant geological volumes of oil and gas, but require an increase in the well productivity coefficient.

Гидравлический разрыв пласта (ГРП) — это один из основных методов интенсификации добычи нефтяных и газовых скважин, а также увеличения приёмистости нагнетательных скважин. Метод заключается в создании системы трещин в плодородном пласте путем закачки жидкости разрыва при давлении, превосходящем давление разрыва пласта, для увеличения притока добываемого флюида (газа, нефти, газоконденсата либо их смеси) к забою скважины.

Успешное применение ГРП на месторождениях в большинстве случаев приводит к резкому увеличению дебита добывающей скважины. Метод позволяет «оживить» простаивающие скважины, на которых добыча нефти или газа традиционными способами становится экономически невыгодной или трудноосуществимой. Также в настоящее время ГРП применяется и для разработки новых нефтегазовых пластов, извлечение углеводородов из которых традиционными методами нерентабельно ввиду низких получаемых дебитов, например, из-за низких показателей проницаемости горных пород.

Впервые экспериментальный ГРП на нефтяной скважине был произведен в США в 1947 г. компанией Halliburton. Жидкостью разрыва и расклинивающим агентом послужили техническая вода и речной песок соответственно. Хотя операция прошла неудачно, на основе опытных данных американский инженер Ж. Кларк годом позднее смог обобщенно описать технологические и теоретические аспекты ГРП, что позволило увеличить эффективность применения метода. 17 марта 1949 г. Halliburton выполнил первые два коммерческих ГРП в округе Стивенс (штат Оклахома) и округе Арчер (Техас).

Положительные эффекты проведения технологии привели к быстрому распростране-

нию метода на месторождениях — к 1955 г. количество операций в США превысило 100 тыс., а уже через 13 лет — 1 млн во всем мире [1]. На рисунке 1 приведена информация по количеству ГРП, проведенных в США за 1949–2014 годы [2].

Как видно из рисунка 1, в середине XX века количество проведенных разрывов пластов увеличивалось, достигло пика в 1980-х годах, но затем пошло на спад. Однако, начиная с 2011 года, вновь наблюдается активное внедрение данной технологии в рамках так называемой «сланцевой революции» — начала крупномасштабной эксплуатации залежей сланцевых пород.

По мере того, как увеличивались знания о механизме процесса, открывались различные жидкости разрыва и расклинивающие материалы, совершенствовалось оборудование для проведения операции, успешность гидроразрыва постоянно увеличивалась и к концу XX века превысила 90 % [3].

Служба энергетической информации (СЭИ) США, изучив последние данные, пришла к выводу, что около 2/3 объемов извлеченного газового конденсата в стране обеспечивается за счет применения гидроразрыва пласта. Доля нефти, добываемой с помощью ГРП, также велика — около половины от текущей добычи США [4].

СЭИ также отмечает, что в последние 5 лет происходит значительное увеличение извлечения нефти, газа и газоконденсата за счет применения технологии ГРП. Если в 2000 г. методом гидроразрыва добывалось более 100 млрд м³ конденсата в день (менее 7 % от общей добычи), то к 2015 г. это число достигло 1,5 трлн м³ в день (более 67 % от общей добычи). Число скважин с ГРП при этом возросло с 26 тыс. до 300 тыс. [5].

Рисунок 1. Количество ГРП, проведенных на нефтяных скважинах в США за 1949–2014 гг.

В СССР первые гидроразрывы пластов начали проводить с 1952 г. Примечательно, что именно советские ученые в своих научных работах смогли качественно разработать теорию образования и распространения трещин. Один из основателей Московского физико-технического института академик Сергей Христианович совместно с Григорием Баренблаттом и Юрием Желтовым изучали аналитические зависимости для определения размеров горизонтальных и вертикальных трещин. Их труды используются и по сей день при создании моделей пластов при разрыве.

Активное применение ГРП в Советском Союзе пришлось на конец 50-х — начало 60-х годов XX в. К середине 60-х количество применяемых операций стало уменьшаться ввиду открытия крупных месторождений Западной Сибири, позволявших добывать «легкую» нефть без применения методов интенсификации. Однако к концу 80-х годов легкоизвлекаемые запасы углеводородов практически истощились, поэтому технология гидроразрыва пласта снова стала актуальной.

В последние десятилетия ГРП является одним из наиболее эффективных методов интенсификации добычи. Расширяя область пласта дренируемой скважиной, метод позволяет внедрять в разработку трудноизвлекаемые запасы нефти, приуроченные к низкопроницаемым, слабодренируемым, неоднородным и расчлененным коллекторам.

На рисунке 2 представлены данные за 2012–2015 гг. о количестве скважин различ-

ных типов с ГРП, принадлежащих компании ПАО «Газпром нефть», а также суммарный дебит скважин каждого типа [2].

Из рисунка 2 можно сделать вывод, что строительство новых наклонно-направленных скважин с ГРП из года в год постепенно сокращается, а на смену им приходят горизонтальные скважины с многостадийным гидроразрывом пласта (МГРП). При этом 241 скважина с МГРП в 2015 г. дала почти столько же нефти, сколько 545 наклонно-направленных скважин с ГРП дали в 2012 г. [6, 7].

При создании трещины жидкость разрыва закачивают в ствол скважины с высоким темпом для увеличения давления в перфорационных каналах выше давления гидравлического разрыва пласта. Дальнейший рост трещины может продолжаться при давлении, называемом давлением распространения трещины, равном сумме напряжений в пласте, падения эффективного давления и перепада давлений в призабойной зоне. В свою очередь, последние два давления зависят от вязкого течения жидкости, поэтому для образования и распространения трещины важны свойства жидкости разрыва.

Идеальный флюид для гидроразрыва должен быть совместим с породами и жидкостями пласта, создавать достаточный перепад давлений по длине разрыва для формирования широкой трещины, обеспечивать транспортировку проппанта в трещину, разрушаться после ГРП, образуя флюид с низкой вязкостью для очистки призабойной зоны после обработки, и быть экономически эффективным.

Рисунок 2. Динамика применения ГРП в ПАО «Газпром нефть» в 2012–2015 гг.

Семейство жидкостей для ГРП состоит из жидкостей на водной и нефтяной основах, кислот и пен. В таблице 1 указаны типы и области применения флюидов для гидроразрывов.

Важными параметрами являются вязкость жидкости (обычно 0,05–1 Па с), чтобы соз-

дать широкую трещину (5–25 мм) и транспортировать в нее проппант (на расстояние от десятков до сотен метров), и плотность. Плотность флюида влияет на устьевое давление закачки и обратный приток флюида из пласта после обработки. Для очистки коллек-

Таблица 1. Жидкости гидроразрыва и условия их применения

Основа	Тип жидкости	Основные компоненты	Применение
Вода	Линейная	Гуар, гидроксипропилгуар (ГПГ), гидроксиэтилцеллюлоза (ГЭЦ), карбоксиметил-гидроксипропилгуар (КМГПГ)	Короткие трещины, низкие температуры
	Сшитая	Сшивающий агент + гуар, ГПГ, КМГПГ или карбоксиметилгидрокси-этилцеллюлоза (КМГПГ)	Длинные трещины, высокие температуры
	Мицеллярная	Электролит + ПАВ	Средние длины трещин, умеренные температуры
Пена	Водная основа	Вспениватель + N ₂ или CO ₂	Низконапорные пласты
	Кислотная основа	Вспениватель + N ₂	Низконапорные карбонатные пласты
	Спиртовая основа	Метанол + Вспениватель + N ₂	Низконапорные водочувствительные пласты
Нефть	Линейная	Гелеобразующий агент	Короткие трещины, водочувствительные пласты
	Сшитая	Гелеобразующий агент + сшивающий агент	Длинные трещины, водочувствительные пласты
	Водная эмульсия	Вода + нефть + эмульгатор	Средние длины трещин, хороший контроль потерь на фильтрацию
Кислота	Линейная	Гуар или ГПГ	Короткие трещины, карбонатные породы
	Сшитая	Сшивающий агент + гуар или ГПГ	Длинные широкие трещины, карбонатные пласты
	Нефтяная эмульсия	Кислота + нефть + эмульгатор	Средние длины трещин, карбонатные пласты

торов с низким пластовым давлением могут применять флюиды с низкой плотностью (такие как пены).

В жидкости разрыва могут добавляться различные химические реагенты для увеличения эффективности операции. В таблице 2 представлены типичные добавки к полимерной жидкости на водной основе [8].

Расклинивающие агенты или проппанты «расклинивают трещину в открытом состоянии» после того, как выключают насосы и трещина начинает смыкаться. Идеальный проппант является прочным, стойким к раздавливанию, коррозионностойким, имеет низкую плотность и легкодоступен при низких затратах. Продукты, которые лучше всего удовлетворяют этим требованиям: кварцевый песок, суперпесок, зерна которого покрыты специальными смолами, и керамические проппанты.

Кварцевый песок добывают в карьерах. В каждом конкретном случае применения песок должен быть проверен на необходимую прочность на сжатие. Как правило, песок применяется для расклинивания трещин в неглубоких пластах. Песок намного дешевле, чем другие виды проппантов.

Суперпесок имеет повышенную прочность и применяется там, где требуется высокое сопротивление сжатию, чтобы минимизировать раздавливание зерен проппанта. Покрытие зерен песка смолой позволяет образовывать в трещине агломераты зерен, препятствующих выносу проппанта в ствол скважины. Суперпесок дороже, но его эффективная плотность ниже, чем у обычного песка.

Керамические проппанты подразделяют на:

- легкие проппанты;
- проппанты средней прочности;

— проппанты повышенной прочности из спеченного боксита.

Прочность керамического проппанта пропорциональна его плотности. Керамические проппанты применяют для гидроразрыва в глубоких (> 2440 м) скважинах, где высокие напряжения в пласте приводят к большим нагрузкам на расклинивающие агенты.

Успех или неудача ГРП часто зависит от качества выбранной скважины. Выбор подходящей скважины часто приводит к успеху, а выбор «плохой» скважины обычно приводит к экономическим потерям. Чтобы выбрать наилучшую скважину для проведения ГРП, инженер-проектировщик должен учитывать множество факторов. Наиболее важными параметрами для ГРП являются проницаемость пласта, распределение напряжений в пласте, вязкость пластовых флюидов, скин-фактор, пластовое давление, глубина залегания коллектора и состояние ствола скважины. Скин-фактор определяет состояние пласта: был ли он подвергнут обработке или поврежден. Если скин-фактор положительный, то пласт поврежден — такая скважина может быть «подходящим кандидатом» для проведения ГРП.

Наилучшие пласты для ГРП содержат значительные геологические объемы нефти и газа, но требуют увеличения коэффициента продуктивности скважин. Такие пласты имеют мощную продуктивную толщу, давления от среднего до высокого, барьеры напряжений, ограничивающие вертикальный рост трещины, а также зону низкой проницаемости либо зону повреждений.

Пласты, которые плохо подходят для ГРП, содержат малые геологические объемы нефти и газа из-за малой мощности продуктивной толщи, низкого пластового давления или

Таблица 2. Химические добавки к жидкостям гидроразрыва

Тип добавки	Назначение	Типичные продукты
Биоцид	Бактерицидное действие	Глутаровый альдегид карбонат
Разрушитель геля	Снижение вязкости жидкости	Кислота, окислитель, разрушитель ферментов
Буфер	Регулирование pH	Бикарбонат натрия, фумаровая кислота
Стабилизатор глин	Предотвращение набухания глин	KCl, NHCl, заменители KCl
Отклоняющий агент	Отклонение потока жидкости	Уплотняющие шарики, каменная соль, хлопья борной кислоты
Понижитель фильтрации	Повышение эффективности жидкости	Дизельное топливо, дисперсные частицы, мелкий песок
Понижитель трения	Снижение потерь на трение	Анионный сополимер
Регулятор железа	Удержание железа на растворе	Уксусная и лимонная кислота
ПАВ	Снижение поверхностного натяжения	Фторуглерод, неионные ПАВ
Стабилизатор геля	Улучшение термостойкости жидкости	Метанол, тиосульфат натрия

небольшой площади. Из коллекторов с чрезвычайно низкой проницаемостью нельзя добыть достаточное количество углеводородного сырья для компенсации всех затрат на бурение и заканчивание скважин даже при успешном гидроразрыве пласта, поэтому такие коллекторы не являются «хорошими кандидатами» для проведения ГРП.

Гидравлический разрыв пласта всегда повышает коэффициент продуктивности скважины, а при определенных обстоятельствах может увеличить конечную добычу. На рисунках 3 и 4 представлены графики, иллюстрирующие иногда наблюдаемые различия между низко- и высокопроницаемыми коллекторами.

Рисунок 3. Продуктивность скважины в высокопроницаемом коллекторе

Рисунок 4. Продуктивность скважины в низкопроницаемом коллекторе

Как видно на рисунке 3, при ГРП в высокопроницаемом коллекторе дренируемый объем и коэффициент извлечения существенно не меняются. ГРП увеличивает дебит скважины, увеличивает темп падения добычи и снижает продолжительность эксплуатации скважины. Конечная добыча не изменяется. Те же запасы будут извлечены за более короткий период времени, что снижает общие эксплуатационные расходы. Ускоренное извлечение фиксированного объема запасов часто имеет преимущества: например, для скважины, расположенной в Арктике или в море на большой глубине, где эксплуатационные расходы очень высоки, скорейшее извлечение запасов очень выгодно.

Рисунок 4 характеризует обычную ситуацию в низкопроницаемых коллекторах. Без ГРП большинство скважин будут малодебитными и позволят извлечь лишь умеренные

объемы нефти и газа, прежде чем достичь предельной рентабельности. Скважина, пробуренная в низкопроницаемый пласт, по определению не будет рентабельной без ГРП. Если интенсификация притока проведена успешно, то дебит, конечная добыча и продолжительность эксплуатации скважины будут возрастать. Как показывает практика, многие скважины в низкопроницаемых коллекторах могут эксплуатироваться в течение 40 или более лет, учитывая адекватные цены на углеводородное сырье и минимальные эксплуатационные расходы. Обычно очень легко оценить рентабельность ГРП в низкопроницаемых коллекторах, когда конечная добыча существенно возрастает.

Выводы

На сегодняшний день гидравлический разрыв пласта является одним из наиболее популярных и эффективных методов интенсификации добычи.

фикации добычи нефти. Применяясь уже несколько десятков лет на практике, технология часто позволяет увеличить продуктивность скважины, проницаемость пласта, расширить зону дренирования, что в конечном счете приводит к увеличению текущего дебита, а ино-

гда — и конечной добычи. Предполагается, что в будущем актуальность метода будет только расти по мере внедрения в разработку месторождений с низкими коллекторскими свойствами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Экономидес М., Олини Р., Валько П. Унифицированный дизайн гидроразрыва пласта: от теории к практике: пер. И.И. Вафин; ред. А.Г. Загуренко. М. — Ижевск: Изд-во. ИКИ, 2007. 236 с.

2. ПАО «Газпром нефть»: официальный сайт компании. URL: <http://www.gazprom-neft.ru/press-center/sibneft-online/archive/2015-december/1110279/> (Дата обращения 15.03.2018).

3. Каневская Р.Д. Зарубежный и отечественный опыт применения гидроразрыва пласта. М.: ВНИИОЭНГ, 1998. 37 с.

4. U.S. Energy Information Administration (EIA) URL: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=26112> (Дата обращения 15.03.2018).

5. U.S. Energy Information Administration (EIA) URL: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=25372> (Дата обращения 15.03.2018).

6. Бархатов Э.А., Яркеева Н.Р. Эффективность применения многозонного гидроразрыва пласта в горизонтальных скважинах // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328, № 10. С. 50–58.

7. Бархатов Э.А., Яркеева Н.Р. Горизонтальные скважины с многостадийным ГРП в условиях Приобского месторождения // NEFTEGAZ.RU: деловой журнал. 2017. № 3. С. 54–58.

8. Лейк Л. Справочник инженера-нефтяника. Т. IV. Техника и технологии добычи : пер. А.Б. Золотухин. М. — Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2017. 1194 с.

REFERENCES

1. Ekonomides M., Olini R., Val'ko P. Unificirovanny dizain gidrorazryva plasta: ot teorii k praktike [Unified Hydraulic Fracturing Design: from Theory to Practice].

Tr. I.I. Vafin. Ed. A.G. Zagurenko. Moscow-Izhevsk, Institute of Computer Science Publ., 2007. 236 p. [in Russian].

2. Official website of PJSC «Gazprom neft'» [Electronic resource]. Available at: <http://www.gazprom-neft.ru/press-center/sibneft-online/archive/2015-december/1110279/> (accessed 15.03.2018). [in Russian].

3. Kanevskaya R.D. Zarubezhnyy i otechestvennyy opyt primeneniya gidrorazryva plasta [Foreign and Domestic Experience of Hydraulic Fracturing Application]. Moscow, VNIIOENG publ., 1998, 37 p. [in Russian].

4. U.S. Energy Information Administration (EIA) [Electronic resource]. Available at: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=26112> (accessed 15.03.2018). [in English].

5. U.S. Energy Information Administration (EIA) [Electronic resource]. Available at: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=25372> (accessed 15.03.2018). [in English].

6. Barhatov E.A., Yarkееva N.R. Effektivnost' primeneniya mnogozonnoy gidrorazryva plasta v gorizontalnykh skvazhinah [The efficiency of multizone hydraulic fracturing in horizontal wells]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2017. Vol. 328, No. 10, pp. 50–58. [in Russian].

7. Barhatov E.A., Yarkееva N.R. Gorizontallye skvazhiny s mnogostadiynym GRP v usloviyakh Priobskogo mestorozhdeniya. [Horizontal Wells with Multistage Hydraulic Fracturing in the Priobskoye Field]. *NEFTEGAZ.RU: delovoy jurnal — NEFTEGAZ.RU: Business Magazine*. 2017, No. 3, pp. 54–58 [in Russian].

8. Lake L. Spravochnik inzhenera-neftyanika. T. IV. Tekhnika i tekhnologii dobychi [Petroleum Engineering Handbook: Vol. IV. Production Operations Engineering]. Tr. A.B. Zolotukhin. Moscow-Izhevsk, Institute of Computer Science Publ., 2017. 1194 p. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ ABOUT THE AUTHORS

Яркеева Наталья Расатовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных и газонефтяных месторождений», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Natalia R. Yarkееva, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Oil-Gas and Oil Field Development and Operation Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

Хазиев Алмаз Мунирович, студент, кафедра «Разработка и эксплуатация нефтяных и газонефтяных месторождений», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Almaz M. Khaziev, Student of Oil-Gas and Oil Field Development and Operation Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: almazkhaziyev@gmail.com