
ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	6
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	8
ВВЕДЕНИЕ	9
Глава 1. ГИДРОРАЗРЫВ ПЛАСТА В ВЕРТИКАЛЬНЫХ СКВАЖИНАХ	15
1.1. Теоретические основы и расчёт параметров ГРП.....	17
1.1.1. Сущность ГРП	18
1.1.2. Технологические схемы ГРП в вертикальных скважинах.....	20
1.1.3. Механизм образования трещины.....	23
1.1.4. Механический расчёт геометрии трещин	27
1.1.5. Модели трещины (РКН и KGD).....	33
1.1.6. Чистое давление разрыва.....	36
1.1.7. Динамика чистого давления разрыва	38
1.1.8. Расчёт технологических параметров ГРП и трещины разрыва	41
1.2. Технические средства и материалы ГРП.....	47
1.2.1. Операции по плану ГРП и технология TSO.....	47
1.2.2. Диагностические тесты перед основным ГРП.....	50
1.2.3. Жидкости ГРП	60
1.2.4. Проппанты и способы их закрепления в трещине.....	64
1.2.5. Техника ГРП	68
1.2.6. Освоение скважины после ГРП.....	82
1.3. Оценка технологической эффективности применения ГРП.....	84
1.3.1. Скважины — объекты ГРП	84
1.3.2. Прогнозирование эффекта от ГРП.....	86
1.3.3. Симуляторы ГРП.....	93
1.3.4. Модификации проппантного ГРП	99
Контрольные вопросы к главе 1	101

Глава 2. РАЗРАБОТКА НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ СКВАЖИНАМИ	104
2.1. Профили и траектории скважин	106
2.2. Принципы разработки нефтяных месторождений горизонтальными скважинами	110
2.2.1. Принципиальные условия использования ГС	110
2.2.2. Общие требования к залежам — объектам строительства ГС	112
2.2.3. Системы разработки месторождений с применением ГС	114
2.2.4. ГС в системах разработки неоднородных пластов с узким диапазоном допустимых пластовых давлений	117
2.2.5. Факторы, влияющие на дебит ГС	119
2.2.6. Типы заканчивания горизонтальных скважин	121
2.2.7. Технологическая оснастка хвостовиков	126
2.2.8. Типы заканчивания многозабойных и многоствольных ГС	133
2.3. Расчёт дебитов горизонтальных скважин	140
2.3.1. Расчёт дебита одиночной горизонтальной скважины	140
2.3.2. Учёт потерь давления по стволу горизонтальной скважины	148
2.3.3. Прогнозирование дебита ГС в элементе с заводнением	156
2.3.4. Расчёт дебита одиночной ГС в случае пласта с подошвенной водой и газовой шапкой	157
2.3.5. Прогнозирование дебита ГС сложной геометрической формы	162
2.3.6. Моделирование притока жидкости к ГС методом эквивалентных фильтрационных сопротивлений	170
2.3.7. Моделирование работы ГС в трёхмерном пространстве	174
2.4. Технологии стимулирования горизонтальных скважин	177
2.4.1. Химические технологии стимулирования ГС	177
2.4.2. Технологии увеличения продуктивности скважины Fishbone — «рыбья кость» и «березовый лист»	182
2.4.3. Интеллектуальное и комбинированное заканчивание скважин	189
Контрольные вопросы к главе 2	195

Глава 3. МНОГОСТАДИЙНЫЙ ГИДРОРАЗРЫВ ПЛАСТА В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИНАХ	197
3.1. Технология и технические средства МГРП в горизонтальном стволе.....	198
3.1.1. Специальное подземное оборудование для МГРП	199
3.1.2. Шаровые муфты ГРП.....	200
3.1.3. Разрывные муфты ГРП	203
3.1.4. Пакеры.....	206
3.1.5. Технологии проведения поинтервального ГРП.....	209
3.1.6. Типы и технологии МГРП.....	212
3.1.7. Повторный МГРП (рефрак).....	222
3.2. Расчёт дебита горизонтальной скважины с МГРП.....	238
3.2.1. Теоретическая модель ГС с МГРП	238
3.2.2. Модифицированная модель установившегося притока жидкости к ГС с МГРП.....	243
3.2.3. Численное математическое моделирование ГС с МГРП.....	258
3.3. Способы мониторинга развития трещины при МГРП	260
3.3.1. Трансформация трещины при МГРП	260
3.3.2. Дизайн трещины в моделях МГРП.....	261
3.3.3. Контроль мест образования трещин в процессе МГРП.....	267
Контрольные вопросы к главе 3	293
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	297

ПРЕДИСЛОВИЕ

Гидравлический разрыв пласта (ГРП) принадлежит к числу наиболее востребованных и обсуждаемых на сегодняшний день методов интенсификации добычи углеводородного сырья. Развитие технологий ГРП способствует не только поддержанию уровней добычи на зрелых месторождениях, но и позволяет увеличивать конечный коэффициент извлечения нефти, а также вовлекать в разработку залежи, эксплуатировать которые ранее считалось нерентабельным. С начала XXI века во всём мире активно развивается направление использования ГРП в горизонтальных скважинах. Довольно часто выбор между горизонтальным стволом, вертикальным стволом с ГРП либо горизонтальным стволом с множественными трещинами разрыва зависит только от экономической ситуации. На принятие окончательного решения и его эффективность влияют реализуемая система разработки, расположение скважины-кандидата относительно действующих скважин, геологическое строение и напряжённое состояние пласта. С учётом современных мировых тенденций в нефтегазовом секторе экономики можно утверждать, что изучение многостадийного гидравлического разрыва пласта (МГРП) в горизонтальных скважинах является одной из наиболее актуальных задач.

Материал учебного пособия изложен в трёх разделах. С современных позиций освещается ГРП в вертикальных скважинах, рассматриваются варианты заканчивания горизонтальных стволов и технологии многостадийного ГРП. Разделы насыщены доступной фактической информацией, а подбор теоретических материалов и их системное воспроизведение объективно характеризуют эволюцию взглядов на ГРП.

Следуя принципу научной преемственности, уделено внимание и общепризнанным положениям, знакомым специалистам по известным «настоящим» монографиям, и новым аспектам, отражённым в публикациях последних лет. Обзор фундаментальных и прикладных концепций сопровождается ссылками на источники, авторов научных работ и учебной литературы.

Помимо технических вопросов, рассматриваются механизмы образования трещин при проведении ГРП, достижения в области контроля и математического моделирования этого процесса. Описание методик расчёта производительности вертикальных скважин с трещиной ГРП, горизонтальных стволов без ГРП и в комбинации с многостадийным ГРП позволяет сравнить существующие подходы и осветить роль факторов, влияющих на приток.

В целом настоящее учебное пособие представляет интерес не только для студенческой аудитории, но и для широкого круга специалистов, занятых в нефтегазовой отрасли. Перечень контрольных вопросов, приведённый в конце каждого раздела, поможет читателю углублённо освоить учебный материал и повысить свой профессиональный уровень.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АКЦ — акустическая цементометрия
БГС — боковой горизонтальный ствол
ВНК — водонефтяной контакт
ВС — вертикальная скважина
ВСП — вертикальное сейсмическое профилирование
ГГЦ — гамма-гамма-цементометрия
ГНКТ — гибкая насосно-компрессорная труба
ГПП — гидropескоструйная перфорация
ГРП — гидроразрыв пласта
ГС — горизонтальный ствол/горизонтальная скважина
КИН — коэффициент извлечения нефти
КРС — капитальный ремонт скважины
МГРП — многостадийный гидроразрыв пласта
МЗГС — многозабойная горизонтальная скважины
МЗС — многозабойная скважина
МЯС — многоярусная скважина
НКТ — насосно-компрессорная труба
ННС — наклонно-направленная скважина
ОКЗС — обратная кинематическая задача сейсморазведки
ПАВ — поверхностно-активное вещество
ПЗС — призабойная зона скважины
ППД — поддержание пластового давления
РМЗС — разветвлённая многозабойная скважина
РННС — разветвлённая наклонно-направленная скважина
СПО — спускоподъёмные операции
ФЕС — фильтрационно-ёмкостные свойства
SAGD — метод парогравитационного дренажа (Steam Assisted Gravity Drainage)
TSO — технология концевой экранирования (tip screenout)

ВВЕДЕНИЕ

Бурное развитие нефтяного бизнеса в начале XX века сопровождалось поиском технологий, позволяющих интенсифицировать добычу углеводородного сырья. В 1930-х годах в США в ходе масштабного применения кислотных обработок призабойных зон скважин (ПЗС) было обнаружено, что при повышении давления закачки возможно нарушение сплошности породы-коллектора и появление высокопроводящей трещины вблизи забоя. Это послужило стимулом для воплощения идеи о возможности разрыва горной породы давлением жидкости, нагнетаемой с поверхности.

Изначально фрекинг (т. е. технология гидроразрыва) был предложен американскими инженерами Флойдом Фаррисом и Дж. Б. Кларком. Первая попытка целенаправленного проведения ГРП была предпринята в США в 1947 году компанией *Stanolind Oil and Gas Corporation* (в настоящее время *Amoco Corporation*). Пробное испытание ГРП было осуществлено в скважине газового месторождения Клеппер в штате Канзас. Жидкостью разрыва служила техническая вода, а расклинивающим агентом — речной песок. Эксперимент окончился неудачно, но инициировал серию технологических и теоретических разработок, успешно реализованных американскими специалистами уже в марте 1949 года. К этому времени лицензию на патент приобрела фирма *Halliburton*, которая и произвела первые коммерчески успешные ГРП в округе Стивенс (штат Оклахома) и округе Арчер (штат Техас). Несмотря на малую изученность и техническое несовершенство, популярность метода росла, и к 1955 году количество операций в США превысило 100 тысяч. К началу 70-х годов XX века суммарное количество операций ГРП во всём мире достигло одного миллиона [47].

В СССР первые гидроразрывы пластов начали проводить с 1952 года советскими учёными С. А. Христиановичем, Ю. П. Желтовым и Г. И. Баренблаттом была разработана теория формирования и распространения трещин ГРП, получившая международное признание. Многие фундаментальные положения этой теории и сегодня используются при создании геомеханических моделей и гидродинамических симуляторов ГРП.

В 1958–1962 годах количество операций ГРП в СССР превышало 1,5 тыс. в год, однако в дальнейшем объёмы внедрения метода стали сокращаться, а в 1970-х годах от него практически полностью отказались. Причиной сокращения объёмов производства ГРП явился ввод в разработку крупных высокодебитных месторождений Западной Сибири, в связи с чем интенсификация добычи нефти на зрелых месторождениях утратила приоритет. Немаловажно и то, что мнения специалистов относительно технологических последствий гидроразрыва пласта разделились. Многие и сейчас склонны считать этот метод добычи варварским, приводящим к разграблению месторождений, провоцирующим ускоренное обводнение и потерю запасов из-за возрастания неоднородности пород.

На рисунке В.1, который приводят авторы [48] со ссылкой на официальный сайт компании ПАО «Газпром нефть», показана динамика операций ГРП, осуществлённых на нефтяных скважинах США. Как можно видеть, в последней четверти XX века количество гидроразрывов пластов в США увеличивалось, достигло пика в 1980-х годах, а затем произошёл спад.

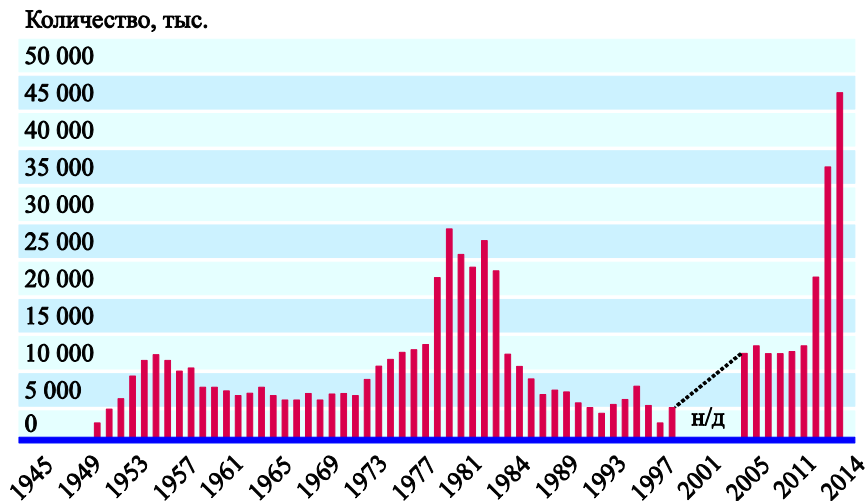


Рис. В.1

Количество ГРП, проведённых на нефтяных скважинах США, за 1949–2014 гг.

В условиях рыночной экономики на внедрение и развитие технологии существенно повлияла политика мировых цен на нефть — многократное повышение в 1973 году и столь же резкое падение до 10 долл./барр.

в 1986 году. Начиная с 2011 года вновь наблюдается активное внедрение ГРП в связи с началом крупномасштабной эксплуатации сланцевых пород.

Нужно отметить, что под термином «сланцевая нефть» понимают нефть двух видов. В частности, так называют получаемую из горючих сланцев тяжёлую битумную нефть, которая существенно отличается от традиционной лёгкой нефти по плотности и вязкости. Одновременно этим же термином обозначают нефть, аналогичную по свойствам обычной лёгкой нефти, но содержащуюся в плотных низкопористых низкопроницаемых породах (сланцах). Чтобы избежать двусмысленности, зарубежные специалисты пользуются двумя терминами: shale oil — для высоковязкой смолы из горючих сланцев, требующей дополнительной обработки для превращения её в нефть, и tight oil — для лёгкой нефти, содержащейся в коллекторах с низкими фильтрационно-емкостными свойствами (ФЕС). ГРП востребован для рентабельной добычи обоих видов сланцевой нефти.

По данным Службы энергетической информации США, на северо-американском континенте в последние годы происходит значительное увеличение добычи нефти, газа и конденсата за счёт применения технологии ГРП. Авторы [48] приводят следующие цифры: если в 2000 году методом гидроразрыва добывалось более 100 млрд м³ конденсата в сутки (менее 7% от общей добычи), то к 2015 году эта величина достигла 1,5 трлн м³ в сутки (более 67% от общей добычи). Число скважин с ГРП при этом увеличилось с 26 тыс. до 300 тыс. На объёмах внедрения метода благоприятно сказались стабильность геэкономической политики крупнейших субъектов нефтяного рынка и ценовой тренд.

В 1980-х годах ГРП стал вновь набирать популярность и в отечественной нефтедобыче в связи с переходом большинства месторождений к поздним стадиям разработки. Необходимость освоения трудноизвлекаемых запасов, приуроченных к низкопроницаемым, слабодренлируемым, неоднородным и расчленённым коллекторам сделала технологии ГРП как никогда актуальными. Интерес к ГРП в России возрос также вследствие перехода к рыночной экономике в 1990-х годах, а в настоящее время продолжается процесс развития и усовершенствования способа гидравлического разрыва пласта [54, 55].

В последние десятилетия геологоразведочные работы всё больше ориентированы на регионы и районы со сложными географическими и геофизическими условиями (Западная Сибирь, Крайний Север, Арктика, Дальний Восток). Приоритетным направлением разработки нетрадиционных запасов углеводородов является сланцевая нефть. Значительное распространение доманикоидов и баженитов на территории основных нефте-

газоносных регионов, полученные промышленные притоки свидетельствуют о потенциальной возможности организации масштабной добычи этой нефти с применением современных технологий. По некоторым оценкам, перспективы добычи нефти из баженовской свиты в России к 2030 году оцениваются в 70 млн т.

Особенностью современного этапа развития нефтегазового сектора экономики является неуклонное сокращение строительства новых вертикальных и наклонно-направленных скважин с ГРП. Во многих регионах мира на смену им приходят горизонтальные скважины с многостадийным гидроразрывом пласта (МГРП). На рисунке В.2 представлены данные за 2012–2015 гг. о количестве скважин различных типов с ГРП, принадлежащих компании ПАО «Газпром нефть», а также суммарный дебит скважин каждого типа. Как подчёркивают авторы [48], из 241 скважины с МГРП в 2015 году получено почти столько же нефти, сколько дали 545 наклонно-направленных скважин с ГРП в 2012 году.

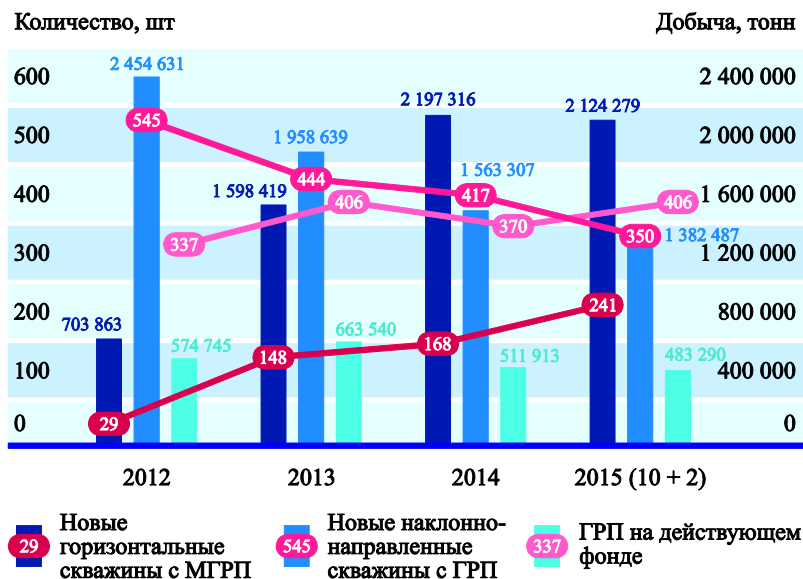


Рис. В.2

Динамика проведения ГРП в ПАО «Газпром нефть» в 2012–2015 гг.
(ПАО «Газпром нефть»: официальный сайт компании. URL: <http://www.gazprom-neft.ru/press-center/sibneft-online/archive/2015-december/1110279/>)

Скважины с большим отклонением забоя от вертикали строятся на суше и на море в США, Канаде, Китае, Австралии, на Северном море, в Великобритании, Норвегии, Аргентине, Венесуэле, России. Если в 1981 году удаление финального забоя от вертикали скважин составляло немногим более 1500 м, то к 2019 году пробурены скважины с горизонтальным удалением забоя до 15 км (о. Сахалин, месторождение Чайво). Горизонтальные скважины имеют большую зону дренирования в коллекторе, тем самым увеличивается добыча в условиях, когда вертикальная нефтенасыщенная толщина слишком мала для вертикальных скважин. Они позволяют осуществлять рентабельную эксплуатацию зон, расположенных вблизи водонефтяного контакта (ВНК), и зон низкой песчанистости.

Применение многостадийного ГРП способствует не только увеличению дебита одиночных горизонтальных скважин, но и ведёт в перспективе к повышению доли выработки трудноизвлекаемых запасов за счёт оптимизации охвата воздействием периферийных участков крупных месторождений. Бурение горизонтальных скважин с МГРП — это базовая технология при добыче сланцевой нефти, в том числе нефти баженовской свиты. Здесь выделяют два основных блока пород: нефтематеринские породы, содержащие твёрдое органическое вещество — кероген, и породы-пропластки, содержащие лёгкую нефть (на долю последних приходится порядка 30% всей толщины бажена). Сложное геологическое строение бажена требует применения нетрадиционных технологий проведения МГРП.

Также в последнее время на карбонатных коллекторах месторождений Волго-Уральского региона, в частности, на месторождениях АО «Самаранефтегаз» и ПАО АНК «Башнефть», широкое применение получил кислотно-проппантный ГРП. Технология кислотно-проппантного ГРП состоит из стадии кислотного ГРП с закачкой кислотной эмульсии (для создания сети трещин в карбонатной породе) и стадии проппанного ГРП с закачкой проппанта на сшитом геле [69].

Одновременно с возрастанием масштабов проведения ГРП отмечены негативные экологические последствия данного метода. В открытых для доступа материалах Национальной Ассоциации нефтегазового сервиса к таким последствиям отнесены: выделение токсичных элементов, опасных для окружающей среды; рост сейсмоактивности; загрязнение грунтовых и поверхностных вод; выбросы в атмосферу метана. В США приняты федеральные законы о защите окружающей среды, касающиеся отдельных аспектов ГРП. В 19 штатах, в совокупности добывающих около 95% углеводородов США, действуют требования об обязательном раскрытии инфор-

мации о химическом составе растворов, применяемых при ГРП. В августе 2016 года в Германии был принят пакет актов, направленных на регулирование технологии гидроразрыва пласта (фрекинга). Вопрос о регламентации работ по ГРП актуален и для России. Нефтяной отрасли необходимы правила (стандарты), регламентирующие порядок проведения гидроразрыва пласта как отдельного технологического процесса с учётом экологических, технологических и экономических рисков. Ведущие нефтяные компании должны направить усилия на решение этого вопроса, так как в ближайшей перспективе ГРП будет оставаться ключевой технологией обеспечения и интенсификации добычи нефти как на традиционных коллекторах, так и на месторождениях с трудноизвлекаемыми запасами.

Глава 1

ГИДРОРАЗРЫВ ПЛАСТА В ВЕРТИКАЛЬНЫХ СКВАЖИНАХ

В течение жизненного цикла при эксплуатации нефтяных и газовых скважин встречаются различные осложнения, связанные как с эксплуатацией применяемого глубинно-насосного оборудования, так и с пластовыми явлениями, вызывающими снижение продуктивности скважин, и, как следствие, снижение их рентабельности. К первой группе относятся осложнения, связанные с коррозией глубинно-насосного оборудования, выпадение асфальтосмолопарафиновых отложений, отложение солей и механических примесей [68]. Ко второй группе можно отнести недостаточный приток вследствие колюматации призабойной зоны скважины, преждевременное обводнение, межпластовые и заколонные перетоки, высокую вязкость нефти в пластовых условиях [67] и пр.

В данном учебном пособии рассматривается один из наиболее эффективных методов воздействия на пласт, позволяющий существенно увеличить продуктивность скважины — гидравлический разрыв пласта. Обсуждение гидроразрыва пласта на страницах данного учебного пособия предполагает рассмотрение только проппантного ГРП. Мы намеренно оставляем в стороне кислотный ГРП, который, как известно, проводится с целью получения наибольших притоков в карбонатных коллекторах. В ходе операций кислотного ГРП сеть трещин создаётся с помощью кислоты и высокого давления без закрепления созданных каналов расклинивающим материалом — проппантом. Отметим лишь, что при определённых условиях возможность закрепления трещин карбонатного коллектора проппантом

всё же существует. Проведение кислотных ГРП с закреплением проппантом технологически может представлять собой чередующуюся закачку кислотных пакетов на основе 15 или 18% соляной кислоты с нагнетанием сшитых гелей в качестве буфера и проппантных пачек при давлениях выше давления разрыва пласта [25]. Для оптимизации технологии предлагается проведение пенно-проппантных кислотных ГРП с использованием в качестве жидкости разрыва вспененного азотом раствора кислоты. К преимуществам пенно-проппантных кислотных ГРП относят более высокую проводимость и эффективную протяжённость создаваемой трещины. К тому же пена выступает как потокоотклонитель, если, конечно, она остаётся стабильной в более высокопроницаемых интервалах в течение всей обработки. Однако спектр недостатков, присущий методу, существенно ограничивает его применение. В частности, пено-проппантный кислотный ГРП требует дополнительного оборудования (азотная установка) и повышенного давления обработки из-за меньшего гидростатического давления; в условиях двухфазного потока возрастают потери давления на трение; вследствие использования сжатого газа повышается риск при закачке рабочих агентов и обработке скважины; существуют ограничения по концентрации проппанта; невозможен контроль качества пены на месте производства работ.

Об испытании новой технологии стимулирования пласта методом ГРП с использованием кислоты и проппанта в 2018 году сообщило ПАО «Газпром нефть» (<https://glavteh.ru/news/кислотный-грп/>). Работы проводились на Восточном участке Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения. Объектом воздействия являлся карбонатный коллектор с низкой проницаемостью и низкой пластовой температурой, аккумулирующий нефть повышенной вязкости. Несмотря на то, что кислотный ГРП применяется компанией для интенсификации добычи с 2013 года, он всё ещё входит в группу технологических вызовов.

Таким образом, практика показывает необходимость дальнейшего развития технологии кислотного ГРП в карбонатных отложениях. Вместе с тем, по технологиям проппантного ГРП в терригенных коллекторах накоплен достаточный промысловый материал, приобретён и систематизирован опыт проектирования, выработано единство мнений относительно оптимальных условий применения метода. Обобщение научных и практических сведений, затрагивающих особенности проппантного ГРП, и определило структуру настоящего учебного пособия.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru