

На правах рукописи

САННИКОВ РАШИТ ХАЙБУЛЛОВИЧ

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ЖИДКОСТЕЙ ДЛЯ БОРЬБЫ С ПОГЛОЩЕНИЯМИ ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН**

Специальность 25.00.15 – «Технология бурения и освоения скважин»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Уфа - 2005

Диссертационная работа выполнена в Уфимском государственном нефтяном техническом университете.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Ишемгузин Евгений Измайлович;
доктор технических наук, профессор
Крылов Виктор Иванович;
доктор технических наук, профессор
Поляков Владимир Николаевич.

Ведущая организация

ТатНИПИнефть

Защита состоится «24» июня 2005 года в 14-00 на заседании диссертационного совета Д.212.289.04 при Уфимском государственном нефтяном техническом университете по адресу: 450062, Республика Башкортостан, Уфа, ул. Космонавтов,1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Автореферат разослан «24» мая_2005 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Ямалиев В.У.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Введение

Актуальность проблемы. На строительство нефтяных и газовых скважин расходуются сотни тысяч тонн обсадных труб и цемента, миллионы кубометров бурового раствора, большое количество других материалов, химических реагентов и т.д., потребность в которых остается высокой. Эта отрасль продолжает испытывать трудности, связанные со значительным удельным весом непроизводительных затрат материально-технических ресурсов и времени. Особенно велик их удельный вес в осложненных условиях. При наличии зон поглощений они составляют свыше 10%, а в наиболее осложненных условиях 25...30% от общих затрат. Эта тенденция продолжает сохраняться, все еще низка успешность и результативность единичной изоляционной операции, не удается достичь прорыва в решении данной проблемы. В этих условиях первейшей задачей буровиков является мобилизация внутренних резервов, сокращение непроизводительных затрат путем усовершенствования существующих и разработки новых, более прогрессивных и эффективных технологических решений и технических средств, позволяющих при минимальных затратах достичь высоких технико-экономических результатов. Поэтому повышение эффективности борьбы с поглощениями при строительстве скважин является весьма актуальной задачей.

Цель работы. Повышение эффективности борьбы с поглощениями путем совершенствования существующих и разработки новых способов, основанных на использовании эффектов интенсивно закрученных потоков бурового и тампонажного растворов.

Основные задачи исследований

1. Изыскание путей повышения эффективности борьбы с поглощениями по традиционной технологии путем повышения точности диагностирования, прогнозирования степени сложности ситуации и выбора стратегии изоляции, разработка оперативного метода отбивки границ интервалов поглощений.

2. Анализ порометрических, фильтрационных и геометрических характеристик пластов с позиций их исследования, тампонирувания и моделирования процессов.

3. Исследование процесса фильтрации вязко-пластичных жидкостей в пластах-коллекторах гранулярного и порово-трещинного типов, влияния свойств жидкостей и режима исследования на определение фильтрационных характеристик пластов; их естественной кольматации твердой фазой буровых растворов.

4. Уточнение методики расчета труб на прочность применительно к закачиванию и продавливанию в пласт высоковязких и нетекучих тампонажных составов.

5. Исследование структуры сильно закрученных потоков, влияния интенсивной закрутки на структуру и свойства тампонажных растворов, полноту вытеснения бурового раствора цементным в кольцевом пространстве скважины, разделительный процесс;

разработка на этой основе новых способов и устройств для борьбы с поглощениями.

6. Разработка технологий борьбы с поглощениями на основе разработанных способов и технических средств, определение их технико-экономической эффективности.

Методы решения поставленных задач. Поставленные задачи решались теоретическими, экспериментальными и расчетными методами. При решении задач диагностирования, прогнозирования и выбора стратегии борьбы с поглощениями использовались математические методы распознавания образов. Задачи по кольматации пластов решались методами классической и волновой гидродинамики, физики пласта, стандартных методов исследования порометрических, фильтрационных, прочностных и иных характеристик пород проницаемого пласта.

При исследовании закрученных потоков, сепарации цементных растворов использовались классические методы изучения вихревых движений, математического моделирования, кинетическое уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова, численные методы.

Экспериментальные исследования по изучению структуры закрученных потоков вязких и вязкопластичных сред, тампонированию моделей пластов проводились на лабораторных установках и промышленных стендах, разработанных на основе теории подобия и физического моделирования, а также в скважинных условиях.

Научная новизна

1. Применение математических методов распознавания образов при принятии решений в условиях неполной определенности в сочетании со специально разработанным алгоритмом позволяет существенно (до 6 %) повысить точность диагностирования, прогнозирования сложности ситуации и выработки стратегии изоляции зон поглощений.

Простым и оперативным методом отбивки границ интервалов поглощений в бурящейся скважине является акустическое зондирование пласта.

2. Разработаны принципы создания физических моделей поглощающих пластов с позиций их исследования и изоляции, установлены основные масштабные соотношения между определяющими параметрами системы и процесса, включая и технические решения, обеспечивающие подобие процессов при ограниченных размерах моделей.

3. При определении удельной приемистости пластов $C_{y\delta}$ нагнетанием вязких жидкостей $C_{y\delta}$ снижается непропорционально вязкости; погрешность в определении $C_{y\delta}$ зависит от проницаемости коллектора (на $\bar{U}14$ %), базы сравнения (на 6...18 %), а также схемы закачивания (на 25...33 %) жидкости. При определении $C_{y\delta}$ нагнетанием вязкопластичных жидкостей влияние базы сравнения на $C_{y\delta}$ снижается (до 3...8 %), но возрастает влияние схемы закачивания (вплоть до изменения знака $\Delta C_{y\delta}$), что обусловлено влиянием пластической прочности структуры раствора τ_0 . Поэтому исследование пластов методом кратковременных нагнетаний следует осуществлять при последовательно возрастающих расходах нагнетания, а τ_0 должна выбираться с учетом репрессии

на пласт ΔP_{nm} к моменту окончания тампонирования.

При естественной кольматации пласта интенсивность фильтрации обратно пропорциональна корню квадратному от продолжительности процесса. Эффективность кольматации можно резко повысить наложением на статическую репрессию волнового поля, генерируемого, например, двумя пересекающимися высокоскоростными струями, при котором достигается защита малопрочных пород от разрушения и ряд других положительных эффектов: их прочность повышается, а проницаемость снижается.

4. Существующие методики расчета труб на прочность всегда дают завышенные против фактических коэффициенты запаса прочности, что свидетельствует о целесообразности их переназначения в сторону снижения.

5. Предложенные для улучшения структуры потока тампонажного раствора технические решения (поворот потока на 90° , вращение труб и др.) не могут быть признаны эффективными. Кардинальное улучшение структуры потока может быть достигнуто при его интенсивной закрутке, что позволяет также резко улучшить реологические и структурно - механические свойства растворов. Коэффициент вытеснения бурового раствора интенсивно закрученным потоком цементного раствора увеличивается по сравнению с таковым при прямоочном потоке по меньшей мере в 1,5 раза.

6. Процесс центробежной сепарации растворов в сепараторе гидроциклонного типа наиболее адекватно описывается кинетическими уравнениями, учитывающими взаимодействие частиц твердой фазы. Получены решения указанного уравнения в классической и стохастической, линейной и нелинейной постановках. Характер и степень изменения плотности, растекаемости, пластической прочности структуры τ_0 , коэффициентов сепарации и эжекции, времени начала и конца схватывания сгущенного раствора, а также прочности цементного камня определяются параметром крутки и зависят от радиуса отбора проб: плотность возрастает по радиусу по экспоненциальному закону; τ_0 может увеличиться более 20 раз; прочность на изгиб - 1,5-1,6 раз; времени начала и конца схватывания снижаются в 1,6 ... 1,7 раз.

Защищаемые положения. На защиту выносятся следующие основные положения.

1. Результаты диагностирования, прогнозирования степени сложности ситуации и выработки стратегии изоляции зон поглощений математическими методами распознавания образов по уточненному алгоритму.

2. Результаты теоретических исследований фильтрации вязких и вязко-пластичных жидкостей в пластах гранулярного и порово-трещинного типов, естественной кольматации пластов, закрученных потоков и разделительного процесса, промысловых исследований кольматации и изоляции пластов с использованием гидроциклонных сепараторов.

3. Уточненная методика расчёта труб на прочность применительно к продавливанию через них высоковязких растворов и нетекучих паст.

4. Устройства для кольматации и тампонирувания пластов, лабораторные и промышленные стенды-установки по исследованию вращающихся потоков и тампонируванию пластов, созданные на принципах физического моделирования процессов.

5. Результаты исследований вращающихся потоков, центробежной сепарации тампонажного раствора и сформировавшегося из него камня, а также тампонирувания моделей пластов.

6. Способы и технологии волновой кольматации и тампонирувания пластов и установки цементных мостов.

Практическая ценность. Результатами исследований, представляющими практическую ценность, являются следующие положения и разработки.

1. Повышение точности диагностирования и прогнозирования и прогнозной оценки степени осложнённости скважин, определения фильтрационных характеристик пластов, оптимизация стратегии изоляции зон поглощений традиционно применяемыми способами и тампонажными составами.

2. Экспериментальные установки - стенды и устройства для волновой и вихревой кольматации стенок скважин, для создания и исследования структуры закрученных потоков и тампонирувания моделей пластов, а также принципы их создания.

3. Уточнённая методика расчёта труб на прочность.

4. Технология и результаты волновой кольматации пластов, изоляции зон поглощений и установки цементных мостов с использованием забойных сепараторов.

Реализация работы в промышленности

1. По результатам исследований изготовлены и испытаны в различных геолого-технических условиях устройства и технологии волновой кольматации, изоляции поглощающих пластов и установки цементных мостов в ПО «Башнефть», «Татнефть», «Куйбышевнефть», «Пермнефть», «Удмуртнефть», «Сургутнефтегаз», «Варьёганнефтегаз», «Нижневартовскнефтегаз», «Ноябрьскнефтегаз», ПГО «Ухтанефтегазгеология», «ВостСибнефтегазгеология», «Оренбурггеология», «Нижеволжскгеология», «Гурьевнефтегазгеология», «Удмуртгеология» (названия предприятий даны применительно к началу использования технологий и устройств). С применением указанных технологий и устройств к настоящему времени построены тысячи скважин.

2. Разработаны при непосредственном участии автора:

- методическое руководство по оперативному контролю и диагностированию осложнённости условий проводки скважин в поглощающих пластах (Уфа, 1975г.);

- технологические инструкции по изоляции зон поглощений (Гурьев, 1986г.; Ухта, 1985г.; Уфа, 1989г.; Нефтекамск - Уфа, 1992 г.);

- технологические инструкции по волновой кольматации пластов: Стандарт ПО "Сургутнефтегаз", 1986 г; Стандарт ПО "Варьёганнефтегаз", 1986г.).

3. Экономический эффект на объём использования разработок диссертации, по которым был произведен расчет, составил 3 326, 73 тыс. руб., из которых на долю автора приходится 913, 30 тыс. руб. в ценах до 1991 г. и 1198, 34 тыс. руб. в ценах 2000 г.

4. Результаты исследований использованы в книгах "Технология бурения глубоких скважин" (М.: Недра, 1982.– 287с.), "Технология бурения нефтяных и газовых скважин" (М.: Недра, 2003.- 509 с.), "Технология бурения нефтяных и газовых скважин" (М.: Недра, 2004.- 509 с.), "Статистическая обработка промысловых данных" (Уфа: УНИ, 1978. – 82 с.; Уфа: УГНТУ, 2001. – 76 с.; Уфа: УГНТУ, 2003.- 77 с.; Уфа, УГНТУ, 2004. – 77 с.), "Теория подобия и моделирование" (Уфа: 2004. –154 с.), "Планирование инженерного эксперимента" (Уфа: 2004. – 75 с.), других учебных и учебно – методических пособиях и в учебном процессе.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и получили положительную оценку на научно – технических советах буровых и геологических предприятий, отраслевых институтов, на республиканских, региональных, Всесоюзных и Международных семинарах, совещаниях, конференциях, симпозиумах в г.г. Альметьевске, Азнакаево, Баку, Братске, Бугульме, Волгограде, Грозном, Ивано-Франковске, Иркутске, Куйбышеве, Москве, Нефтекамске, Петропавловске – Камчатском, Сургуте, Туапсе, Уфе в период с 1974 по 2004 гг.

По технике и технологии волновой кольтации и изоляции зон поглощений разработаны стандарты предприятий. Технические и технологические решения по исследуемой проблеме экспонировались на ВДНХ СССР и республиканских выставках.

Отдельные разделы и положения работы докладывались на научных семинарах кафедры бурения н/г скважин и НТС ГНФ. В полном объеме работа докладывалась на заседаниях кафедры бурения в 2002, 2003, 2004 г.г.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, семи глав, основных выводов и приложений, изложена на 244 страницах машинописного текста и содержит 42 рисунка, 46 таблиц. Список литературы включает 347 наименований.

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в 100 печатных работах, в т.ч. в 8 авторских свидетельствах, 15 патентах, 13 из которых зарубежные.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, приведены основные результаты, научные положения и выводы, выносимые на защиту.

В первой главе дан обзор работ, посвященных проблеме борьбы с поглощениями. Рассмотрены вопросы: распространенность поглощений по нефтегазовым регионам мира, сущность явления; факторы, обуславливающие поглощения и их классификация; методы

и технические средства для исследования поглощающих пластов и их эффективность; способы, тампонажные материалы и технические средства для изоляции зон поглощений, их классификация и результативность и некоторые другие.

Большой вклад в решение проблемы борьбы с поглощениями внесли отечественные и зарубежные исследователи. Исследование физико-химических свойств и механики сплошных сред дано в трудах Г. С. Абдрахманова, Л. А. Алексеева, Г. И. Баренблатта, Л. М. Бреховских, Н. Н. Веригина, В. И. Крылова, Б. М. Курочкина, М. Р. Мавлютова, А.Х. Мирзаджанзаде, В.И. Мищевича, В.Н. Николаевского, И.С. Польшакова, В.Н. Полякова, Г.А. Ситдыкова, П.М. Тяна, С.С. Яковлева, Д.Р. Грея, В.С. Лоинса, С.Л. Мамбергера, М. Маскета и др. Из обзора следует, что поглощения и проблема борьбы с ними – категории глобального порядка, однако методы исследований, классификации, применяемые способы, материалы и технические средства носят, скорее всего, локальный характер.

Все многообразие факторов, обуславливающих поглощения, можно свести к трем группам: геологической, технической и технологической, хотя единой классификации даже в пределах одного и того же нефтегазового региона нет. Нет единой классификации также в методах исследования зон поглощений, выборе способов, технических средств и тампонажных материалов. В указанных выше работах описаны способы регулирования влияния технологических факторов на поглощения и их предупреждение. Большая роль при этом отводится физико-химическим, реологическим и структурно-механическим свойствам буровых и тампонажных растворов, методам их регулирования, а также способу бурения, характеристике насосной группы, компоновке инструмента, расходу раствора, скорости спуска и подъема бурильной колонны.

Главной целью исследований поглощающих пластов во все времена было и остается получение их характеристик, на чем строится содержание и объем всех последующих работ. Метод гидродинамических исследований (ГДИ) с его разновидностями в историческом плане был первым для определения фильтрационных характеристик пластов, в качестве которых обычно принимались приемистость, удельная приемистость, а иногда – гидропроводность пластов. По результатам исследований строились индикаторные диаграммы, производились классификации пластов и/или скважин, осуществлялся выбор технологии и технических средств для их изоляции, которые имели преимущественно локальное значение. Постепенно пришло понимание того, что технология изоляции, основанная лишь на результатах ГДИ, во многих случаях неэффективна и нередко приводит к парадоксальным ситуациям: пласты, которые должны были бы легко изолироваться закачкой тиксотропных буровых растворов, в действительности не удается изолировать нагнетанием цементных растворов и даже быстросхватывающихся смесей (БСС). Стало ясно, что определяющим фактором при изоляции пластов являются размеры, форма каналов, их распределение в пласте и др., т.е. порометрическая характеристика пласта (ПМХП). Поэтому немало усилий исследователей и специалистов

в области борьбы с поглощениями в последующем было направлено на разработку методов определения ПМХП. Было предложено множество методов, таких как метод отпечатков, анализ фракционного состава шлама или наполнителей, уносимых в пласт, определение размеров каналов по данным ГДИ, по изменению механической скорости бурения в пластах с различной ПМХП и др., причем два последних метода являются косвенными, тогда как первые можно отнести к прямым методам. Относительно недавно были предложены еще два прямых, более совершенных, метода: фотографирование стенок скважины (ФСС) и скважинная акустическая телеметрия (САТ). Однако прямые методы в силу различных причин практически не применяются, и основным методом по-прежнему продолжает оставаться метод ГДИ, хотя и часто дополняемый другими, обычно геофизическими методами; погрешность в определении размеров поглощающих каналов может достигать при этом нескольких, а иногда нескольких десятков раз. Одновременно разрабатывались тампонирующие смеси различного состава с широким спектром реологических, структурно-механических свойств, как для временной изоляции пластов, так и отверждаемые, с различным механизмом и кинетикой отверждения, на основе тампонажного портландцемента и различных полимеров, либо их смеси; дальнейшее развитие получил метод намыва в пласты наполнителей, резко возросла их номенклатура и т.д. Были достигнуты определенные успехи, однако революционного прорыва в проблеме борьбы с поглощениями не произошло. Стало ясно, что даже точное знание ПМХП еще не гарантирует успешной изоляции пласта: главная причина низкой результативности единичной изоляционной операции заключается в несоответствии тампонирующих свойств доставленной в пласт смеси ПМХП и в результате – несоответствие механизма снижения проницаемости пород их фильтрационным свойствам, из-за чего смесь не удерживается в каналах пласта, а растекается далеко вглубь его, не создавая изоляционного экрана. Если даже параметры смеси в момент ее приготовления на устье соответствуют ПМХП, это вовсе не означает того, что они будут соответствовать ПМХП после ее доставки в пласт, так как смесь при движении по каналу, особенно по открытому стволу, подвергается разжижающему воздействию и бурового раствора, и пластовой жидкости из-за вовлечения последних в нисходящий поток, что объясняется нерациональной структурой потока и является особенностью и главным недостатком, органически присущим традиционной технологии изоляции зон поглощений с доставкой смеси в пласт прямоточным потоком.

На основании анализа в работе показано, что динамика ухудшения качества смеси может быть схематично представлена в виде блок-схемы, показанной на рис.1.

Из блок-схемы с учетом приведенных под ней пояснений ясно, что имеются все условия к тому, чтобы возникла ситуация, когда $Q_f \ll Q_r$. Таким образом, неточное знание ПМХП усугубляется еще и ухудшением, нередко до катастрофически низкого уровня, качества тампонирующей смеси. Поэтому очевидна необходимость дополнения

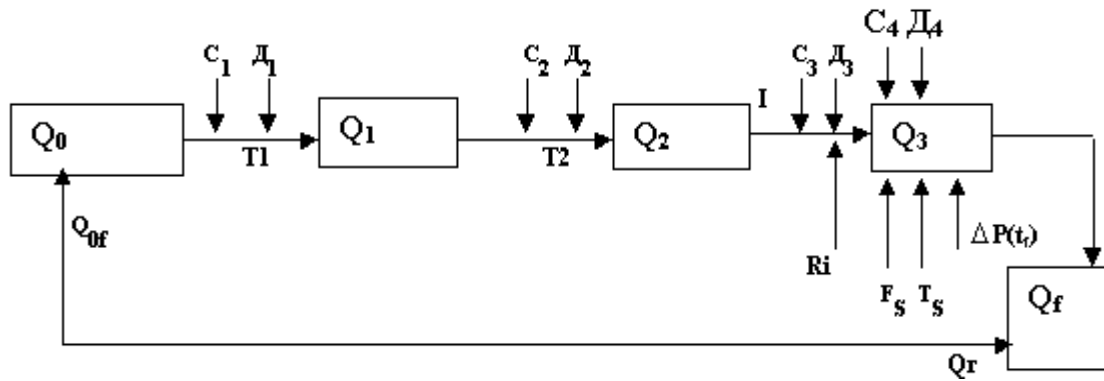


Рис.1. Динамика ухудшения качества смеси:

Q_0 – качество исходной смеси; T_1 и T_2 – транспортировка смеси по трубам и по стволу скважины из-под труб в зону поглощения; C_1 и D_1 – загрязнение и разбавление смеси при транспортировке по трубам; C_2 и D_2 – то же при транспортировке по стволу скважины; C_3 и D_3 – то же в процессе закачивания смеси в пласт; I и R_i – процесс и режим закачивания;

F_s , T_s и $\Delta P(t_f)$ – пластовый флюид, температура и репрессия на пласт при нахождении смеси в пласте;

C_4 и D_4 – загрязнение и разбавление смеси при нахождении ее в пласте; Q_f – конечное качество смеси в результате всех воздействий; Q_r – требуемое качество смеси, т.е. то качество, при котором она может схватиться, затвердеть и образовать сплошной, малопроницаемый и прочный изоляционный экран.

результатов ГДИ данными определения ПМХП прямыми методами и совершенствования структуры потока, например, путем интенсивной его закрутки на выходе из-под бурильных труб. В случаях, когда прямые методы не применяются, результаты определения ПМХП по косвенным характеристикам подчиняются стохастическим закономерностям, отражающим весь ход эволюции пласта с момента начала его формирования, что и предопределяет целесообразность применения математико - статистических методов.

На конкретном промышленном материале в работе показано, что в деле диагностирования, прогнозирования и выработки стратегии изоляции зон поглощений достаточно эффективными являются математические методы распознавания образов, которые позволяют широко использовать косвенные априорные характеристики пластов.

Из практики известно, что при незначительной (доли мм) раскрытости каналов поглощения обычно удается ликвидировать самым простым способом – закачкой тиксотропных буровых растворов. Разработаны различные способы кольматации, в том числе струйная с ее разновидностями, которые показали в целом хорошие результаты в прочных породах, но малоприменимы в малопрочных породах из-за гидроэрозионного их разрушения. Для них необходима разработка иных способов кольматации, которые, наряду с эффективной кольматацией, воздействовали бы на них упрочняюще.

Для изоляции пластов с крупными каналами поглощения в последнее время разработаны смеси с особо крупноразмерными (до 30..40 мм по характерному размеру) наполнителями, густые тампонажные пасты с пластической прочностью в 1,5...4,5 кПа, соответствующая тампонажная техника, а также профильные перекрыватели, которые

показали высокую технологическую эффективность. Однако продавливание таких паст в пласт требует приложения на устье больших давлений, специальной технологии и техники, дополнительного оборудования, а профильные перекрыватели пока сравнительно дороги. Не определены также в полной мере области их экономически эффективного применения. Поэтому на практике обычны случаи, когда к ним прибегают лишь после многократных безуспешных попыток изоляции тампонажными составами, что ведет к еще большему удорожанию изоляционных работ и лишний раз доказывает необходимость и роль диагностирования и прогнозирования степени сложности ситуации.

На основании проведенного анализа сформулированы цель работы и определены задачи исследований.

Вторая глава посвящена совершенствованию способов борьбы с поглощениями применением математических методов распознавания образов и традиционной технологии. В тех случаях, когда прямые методы исследований не применяются, большое значение приобретает диагностирование степени осложненности скважины по косвенным признакам, равно как и проблема выработки оптимальной стратегии изоляции зон поглощений. Для принятия адекватных решений в условиях неполной определенности большое значение приобретает прогнозирование осложнений и степени их тяжести. Наиболее приемлемыми в таких ситуациях являются математические методы распознавания образов. На большом объеме фактического материала в работе показано применение метода главных компонент для диагностирования и прогнозирования степени сложности ситуации и последовательной диагностической процедуры Вальда - для выработки оптимальной стратегии изоляции зон поглощений. Их эффективность составила в среднем 80%. Дальнейшим развитием методов является их приложение к системе автоматизированного проектирования бурения. Эффективность такого подхода также показана на конкретном промышленном материале.

При тампонировании пластов закачиванием нетекучих паст с доставкой их по трубам, особенно при продавливании в пласт, приходится создавать на устье давление, достигающее 12...15 МПа. В этой связи рассмотрены вопросы прочности труб. Решена задача Ламе с последующим применением концепции Треска-Сен-Венана об эквивалентных напряжениях. Расчеты показали, что существующие методики, предусматривающие отдельный расчет труб на растягивающие усилия и внутреннее давление, всегда дают заниженные значения напряжений. Разница в уровне напряжений в наиболее нагруженном (чаще у устья скважины) сечении в зависимости от вида производимых в скважине работ может составлять от 10...15 % (при бурении) до десятков процентов (при заливке зон поглощений нетекучими пастами, раздаче профильных перекрывателей), что может в ряде случаев представлять опасность для целостности труб и исполнителей работ.

Предложены простые формулы для расчета напряжений от внутреннего избыточного давления, эквивалентных напряжений и уточненная методика расчета труб на прочность.

Рассмотрен вопрос изоляции зон осложнений профильными перекрывателями и о дальнейшем расширении области их наиболее эффективного применения, а также сравнительная оценка эффективности их и способа изоляции нетекучими пастами. Хотя последний в ряде случаев может конкурировать с профильными перекрывателями, однако при наличии в пласте сверхкрупных каналов (раскрытость 30...40 мм и более) лучше сразу же устанавливать перекрыватели. При меньших размерах каналов выбор способа следует осуществлять исходя из опыта применения этих способов. Если в скважине последовательно вскрываются несколько зон интенсивных поглощений, то изоляцию лучше производить профильными перекрывателями без потери диаметра. В таких случаях способ изоляции превращается, по сути, в новый способ строительства скважин. Изобретение под таким названием с участием автора запатентовано в ряде зарубежных стран, в т.ч. в США, Японии, Канаде и др.

В третьей главе исследована фильтрация жидкостей в пластах в теоретической постановке. Особенностью закачивания ВПЖ в пласт является то, что при этом в пласте одновременно будут двигаться по меньшей мере две жидкости с резко отличающимися свойствами: нагнетаемая жидкость в ближней зоне и пластовая вода – в дальней. Контурная поверхность, разделяющая их, будет перемещаться по пласту, будет иметь место непрерывное перераспределение давления в них. Свойства ВПЖ, репрессия на пласт и её распределение при этом будут изменяться и во времени, и по радиусу пласта сложным образом. Поэтому необходимо установить изменение репрессии на пласт по мере закачивания ВПЖ, а также распределение перепада давления в ближней и дальней зонах и выяснить условия, когда перепадом давления в последней можно пренебречь.

Ещё один фактор, весьма существенно влияющий на поведение ВПЖ в пласте, – это тип коллектора, который в целях простоты будем считать гранулярным или трещинным в зависимости от преобладающего типа коллектора. Анализ порометрических характеристик пластов (ПМХП) и их влияния на фильтрационные характеристики (ФХП): гидропроводность, приемистость или удельную приемистость, – показывает, что при определении их косвенными методами погрешность может достигать нескольких раз. Применительно к тампонированию пластов составами, содержащими твердую фазу, найдены ограничения на размеры ее частиц с учетом ПМХП. Так, частицы обычно используемого цемента не будут проникать в каналы пласта, если проницаемость его ниже 20...60 мкм^2 (соответственно для коллекторов гранулярного и трещинного типа).

Рассмотрено влияние различных факторов на определение ФХП и тампонирование пластов: расхода Q , продолжительности t и порядка изменения расхода при закачивании ВЖ и ВПЖ. За ФХП принимались приемистость и удельная приемистость, которые определялись двояко: в виде отношения расхода к репрессии и разности двух расходов к разности репрессий. Давления и перепады давления вычислялись по формулам, полученным из решения уравнений фильтрации ВЖ и ВПЖ в пластах. В результате получено, что:

- при закачивании ВЖ с ростом η удельная приемистость C_{yd} снижается непропорционально увеличению η , что является следствием влияния дальней зоны;
- C_{yd} на 6...18 % зависит от того, что принять за базовый расход;
- при закачивании со снижающимся расходом C_{yd} на 25...33 % выше;
- влияние Q и t на C_{yd} проявляется опосредованно через радиус проникновения ВЖ.

Основное уравнение плоско - радиальной фильтрации жидкости в гранулярном коллекторе имеет вид

$$d(rV)/rdr = 0, \quad (1)$$

где V – средняя по сечению скорость течения ВПЖ в пласте; r - текущий радиус.

Если справедлив закон Дюпюи, то для перепадов давления в ближней ΔP_1 и дальней ΔP_2 зоне можно записать соответственно $\Delta P_1 = A \cdot \eta^* \cdot \ln R_1 / R_c$;

$$\Delta P_2 = A \cdot \mu \ln R_\phi / R_1, \quad (2)$$

где $A = Q/2\pi kh$; R_c, R_1, R_ϕ – соответственно радиус скважины, ближней и дальней зоны; μ и η^* - абсолютная вязкость пластовой воды и эффективная вязкость ВПЖ, которая согласно представлениям Букингама может быть оценена как

$$\eta^* = \eta + \tau_0 d_s / 6V_{cp}, \quad (3)$$

где η и τ_0 - структурная вязкость и пластическая прочность структуры ВПЖ;

Средняя скорость может быть найдена одним из двух способов в зависимости от способа задания условий на входе в пласт. Учитывая, что чаще производится пакерная заливка, будем считать заданным на входе в пласт расход Q . В результате получено

$$P_1(r) = P_{nl} + \frac{Q}{2\pi \cdot h \cdot k} \left(\mu \cdot \ln \frac{R_\phi}{R_1} + \eta \cdot \ln \frac{R_1}{r} \right) + \frac{\tau_0 \cdot d_s \cdot m_0}{6 \cdot k} (R_1 - r), \quad (4)$$

где P_{nl} - пластовое давление; h, m_0 и k – толщина, пористость и проницаемость пласта; d_s - эффективный диаметр пор; R_1 и R_ϕ - радиус зоны проникновения ВПЖ и переднего фронта возмущения пласта.

Решение (4) является наиболее общим, из него легко получить частные решения, например, в виде перепадов давления между любыми радиусами пласта. Если произвести расчленение (4) на перепады, обусловленные силами вязкости ΔP_η и пластической прочности ΔP_{τ_0} , то можно дать сравнительную оценку зависимости их от различных факторов. В работе даны такие оценки, которые в основном сводятся к следующим.

При закачивании ВПЖ в гранулярный коллектор известные логарифмические законы распределения $P(r)$ и $\Delta P(r)$, свойственные течению ВЖ, сильно искажаются благодаря наличию у ВПЖ τ_0 , причем тем сильнее, чем больше τ_0 . Величина $\Delta P(r)$ растет почти пропорционально r . Влияние дальней зоны составляет не более 3...5 %.

Сильно отличающиеся по C_{yd} результаты получаются при закачивании ВПЖ по схеме со снижающимся расходом, что обязано особенному влиянию τ_0 на процесс: через глуби-

ну проникновения и ядро потока.

Учитывая, что при фильтрации жидкостей в коллекторах трещинного типа чаще наблюдается нелинейный характер зависимости $Q = f(\Delta P)$, вместо линейного принято

$$\text{уравнение} \quad V = -\frac{C}{\eta^*} \left(\frac{dP}{dr} \right)^{0.5}, \quad (5)$$

где C -коэффициент, характеризующий пропускную способность трещин с размерностью $[C] = [Па^{0.5} м^{1.5}]$; η^* - эффективная вязкость ВПЖ в выше оговоренном смысле.

Заметим, что в отличие от предыдущего случая здесь V – истинная скорость.

Если оставаться в области только действительных чисел, то (5) имеет смысл лишь для $(dP/dr)^{0.5} \geq 0$, что может иметь место только для случая притока из пласта. Другой, более простой способ состоит в использовании того свойства, что репресссионная воронка является зеркальным отображением депрессионной воронки. Следовательно, для получения кривой распределения давления при нагнетании жидкости необходимо:

- 1) получить решение (5) для случая отбора жидкости (т.е. для $P' > 0$);
- 2) разворотом кривой на 180° получить решение для случая нагнетания ВПЖ.

В результате решение (5) получено в виде

$$P_1(r) = P_{\text{ин}} + \left(\frac{\mu Q}{2\pi h m_{\text{от}}} \right)^2 \frac{1}{C^2} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_\phi} \right) + \frac{v_\tau^2}{C^2} (R_1 - r) + \frac{v_\tau Q \eta}{\pi h m_{\text{от}} C^2} \ln \frac{R_1}{r} + \left(\frac{\eta Q}{2\pi h m_{\text{от}}} \right)^2 \frac{1}{C^2} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R_1} \right), \quad (6)$$

где v_τ - параметр трещинной среды.

При закачивании ВПЖ в трещинный коллектор распределение $P(r)$ и $\Delta P(r)$, $P(R)$ и $\Delta P(R)$, а, следовательно и $C_{y\partial}$, определяются главным образом раскрытостью каналов поглощения, смешанной пористостью m_{om} и величиной τ_0 . С ростом Q и η и снижением m_{om} доля вязкостной составляющей ΔP_η растет во второй степени. При данном Q и τ_0 доля $\Delta P_\tau(R)$ с увеличением R растет линейно. Влияние дальней зоны исчезающе мало и им можно пренебречь. Принципиальное отличие в ΔP_{τ_0} и ΔP_η заключается в том, что первый растет пропорционально R , а второй приходится лишь на $0,8 \dots 1,0$ м пристенного участка пласта. Способ выражения $C_{y\partial}$ также существенно влияет на определение $C_{y\partial}$.

Наибольшее отличие в 36 % имеет место при малых b и m_{om} . Для случая течения ВПЖ в трещинном коллекторе различались жесткий и мягкий режимы фильтрации.

Решения (4) и (6) получены впервые.

До сих пор движение ВПЖ в пласте рассматривалось без учета его кольматации. Если твердая фаза раствора хотя бы частично не будет проникать в пласт, то на стенке будет образоваться корка, проницаемость которой кратно ниже проницаемости пласта. Поэтому интенсивность фильтрации по мере роста толщины корки должна ослабевать. Она будет ослабевать также из-за проникновения фильтрата раствора и взаимодействия его с пластом и увеличения порового давления в породе. Поэтому представляет интерес

выяснить изменение толщины корки, порового давления, глубины проникновения фильтрата и интенсивности процесса фильтрации в динамике.

Отметим, что в такой постановке этот вопрос ранее не рассматривался.

Известны работы по определению давления в пористой среде при динамической фильтрации растворов, но задача решена или для пористой среды конечной толщины, или с допущением о постоянстве толщины корки, что не соответствует реальности. Вопросы фильтрации суспензий рассмотрены в монографии В.А. Жужикова, но фильтры приняты ограниченной толщины, не учитываются упругие свойства жидкостей и т.д..

В данной работе рассмотрена одномерная фильтрация раствора с вязкостью μ , содержащего твердую фазу, в пористую среду в общей постановке. На обнаженную поверхность среды в момент $t=0$ начинает действовать давление раствора P_c . Начальное давление равно P_0 . Под действием перепада давления ΔP в пласте происходит фильтрация с образованием трех зон: 1 - фильтрационная корка с пористостью m_1 , проницаемостью k_1 и пьезопроводностью χ_1 ($-l_1 \leq x \leq 0$); 2 - зона проникновения фильтрата в породу с параметрами m_2, k_2, χ_2 ($0 \leq x \leq l_2$); 3 - порода, насыщенная пластовой водой, с параметрами m_3, k_3, χ_3 ($l_2 \leq x$). Из-за взаимодействия фильтрата с породой величины k_2 и μ_2 в общем случае будут отличаться от первоначальных.

Можем записать следующее уравнение нестационарной фильтрации:

$$\chi_i \frac{\partial^2 P_i(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\partial P_i(x,t)}{\partial t}, \quad (7)$$

где при $i = 2$ будем иметь уравнение для зоны проникновения фильтрата в породу, а при $i = 3$ – для зоны, насыщенной лишь пластовой жидкостью.

Решения (7) получены в функциях Крампа, которые приведены в работе. Из них следует, что толщина корки и глубина проникновения фильтрата растут, а интенсивность фильтрации q снижается обратно пропорционально корню квадратному от времени фильтрации. Отсюда вытекает, что полностью прекратить поглощения таким методом не удастся. Корка при этом получается толстая и рыхлая, а процесс длителен во времени. Поэтому кольматацию следует осуществлять принудительно, путем разработки новых способов и технических средств, работающих на иных принципах. Это одна сторона вопроса. Другая заключается в том, что l_1, l_2, q и ΔP зависят от свойств всех трех сред, раствора, фильтрата, перепада давления. Интенсивность поглощений можно снижать или путем снижения проницаемости корки, или зоны проникновения фильтрата.

Эти результаты получены для наиболее общей постановки. Из них легко получить частные случаи. Так, если в пласт раствор фильтруется вместе с твердой фазой (либо последняя отсутствует), то корка не образуется. Если $k_2 = k_3$, то получим решения Веригина Н.Н. Для газового пласта можно принять $\mu_3 = 0$. При фильтрации раствора на водной основе в водоносный пласт, когда взаимодействием фильтрата раствора и пласто-

вой жидкости можно пренебречь, можно положить $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu$; $k_2 = k_3$.

В работе рассмотрено влияние различных факторов на процесс и результат изоляции пласта. Считается, что наиболее важными технологическими факторами, определяющими результат тампонирования, являются пластическая прочность структуры раствора, толщина изоляционного экрана и репрессия на пласт при тампонировании. Показано, что на успешность изоляционной операции при прочих равных условиях будет влиять в значительной мере также и репрессия на пласт по окончании тампонирования $\Delta P_{пт}$, на что ранее не обращалось внимания. Хотя указанные факторы можно рассматривать в отдельности, однако результат тампонирования будет определяться этими факторами лишь в совокупности. В силу сказанного в работе рассмотрены природа и роль различных факторов в создании репрессии на пласт в процессе тампонирования пласта и по его окончании. Показано, что по значимости факторы можно расположить в последовательности: глубина залегания пласта, плотность бурового раствора, индекс пластового давления, высота столба тампонажного раствора $h_{цм}$ в скважине и толщина пласта. Показано, что путем регулирования $\Delta P_{пт}$, $h_{цм}$, а также высоты столба бурового раствора в скважине и толщины цементного экрана можно предупредить растекание последнего.

В работе рассмотрен вопрос совершенствования методов исследования пластов. На основе анализа методов, предложенных в разное время различными исследователями, и полученных при этом в промышленной практике результатов в работе сделан вывод о том, что наилучшие результаты изоляции пласта обычно достигаются при применении, наряду с ГДИ, прямых методов исследований. В работе предложен простой способ локализации поглощающих участков пласта - метод акустического зондирования.

Четвертая глава посвящена теоретическим исследованиям интенсивно закрученных потоков и возможности их полезного использования применительно к скважинным условиям для борьбы с осложнениями.

Пусть жидкость подвергается интенсивной закрутке на входе в цилиндрическую трубу круглого сечения с помощью какого-либо завихрителя. Для исследования вихревого движения можно принять уравнение в форме Громеки-Ламба для стационарного случая

$$\text{grad } \Phi = \vec{V} \times \text{rot } \vec{V}, \quad (8)$$

где $\Phi = P/\rho + 0,5 \cdot V^2$; P и V - давление и полная скорость.

Для характеристики вихревого движения введем такие параметры, как функция тока ψ , завихренность $\omega = -r \partial \Phi / \partial \psi$ и функция циркуляции $S = r V_\phi = S(\psi)$.

Характер и параметры вихревого движения жидкости в трубе существенно зависят от ряда факторов, важнейшими из которых являются:

- 1) местоположение, геометрические размеры и форма питающих вводов;
- 2) соотношение между дифференциальными и интегральными параметрами в приосевой и периферийной областях трубы. В зависимости от последнего вход может быть

равновесный и неравновесный. Первый означает, что между стенкой и осью трубы имеет место динамическое равновесие. При этом на $r = R_0$ при $V_\varphi = V_0$ распределение будет: в вихревом ядре ($r \leq 0 \leq R_0$) $V = V_0 r / R_0$; в пристенной области ($R_0 \leq r \leq R$) $V = V_0 R_0 / r$.

Пусть R_b – радиус такой цилиндрической поверхности, что внутри нее движение вихревое, а вне – потенциальное. В общем случае может иметь место $R_b > R_0$.

Если обозначить $\mu = R_b / R_0$, то при $\mu > 1$ радиус вихревой зоны будет увеличиваться, а при $\mu < 1$ – уменьшаться.

Путем ряда последовательных преобразований (8) можно представить в виде

$$\frac{\dot{\Gamma}^2 \Psi}{\dot{\Gamma} \partial^2} - \frac{1}{r} \frac{\dot{\Gamma} \Psi}{\dot{\Gamma} \partial} + k^2 \Psi = 0, \quad (9)$$

где $k = 2V_0 / R_0 V_{z_0}$; V_{z_0} – средняя скорость осевого движения; .

Общее решение (9) выражается через функции Бесселя I и II рода, а частное решение – через функцию Бесселя I рода $J(kr)$.

В работе дан анализ полученного решения. Трансформация исходного режима в вихревой возможна при $2R_0 V_0 / R V_{z_0} \geq 3,83$, или то же самое $2\pi R^3 / n f_{\text{ex}} R_0 \geq 3,83$,

где n и f_{ex} – количество и площадь сечения тангенциальных вводов.

В частности, получено

$$V_z = V_{z_0} \left[1 + \frac{1}{2} (R_0^2 - R_b^2) \frac{k}{R_b} \frac{J_0(kr)}{J_1(kR_b)} \right]. \quad (10)$$

Если подставить вычисленные значения функций в (10), то получим $V_z(0) = -14,7 V_{z_0}$.

Это означает, что по оси трубы возникает обратный ток значительной величины.

Уравнение для вихревой зоны с учетом возникновения возвратного течения принимает вид

$$\frac{\dot{\Gamma}^2 \Psi}{\dot{\Gamma} \partial^2} - \frac{1}{r} \frac{\dot{\Gamma} \Psi}{\dot{\Gamma} \partial} + k^2 \Psi = \frac{1}{2} k^2 V_{z_0} r^2,$$

решение которого получено в виде

$$4\mu k_0 [J_1(k_0) Y_0(k_0) - J_0(\mu k_0) Y_1(k_0)] = [8 - (\mu k_0)^2] [J_1(k_0) Y_1(\mu k_0) - J_1(\mu k_0) Y_1(k_0)], \quad (11)$$

где $kR_0 = k_0$; $\mu = R_y / R_0$; R_y – радиус рециркуляционной зоны.

При неравновесном вводе происходит перестройка потока между слоями жидкости, появляются радиальные потоки, которые тем интенсивнее, чем больше степень неравновесности на входе в трубу.

Пусть $\omega_\varphi = -\alpha \cdot r$, где α – некоторая постоянная, характеризующая меру неравновесности потока на входе, и выполнены все предыдущие условия. Тогда завихренность можно представить в виде $\partial \Phi / \partial \psi = 0.5 k^2 V_{z_0} + \alpha = \beta$, а уравнение вихревого движения

$$\frac{\dot{\Gamma}^2 \Psi}{\dot{\Gamma} \partial^2} - \frac{1}{r} \frac{\dot{\Gamma} \Psi}{\dot{\Gamma} \partial} + \frac{\dot{\Gamma}^2 \Psi}{\dot{\Gamma} \partial^2} + k^2 \Psi = \beta r^2. \quad (12)$$

Решение (12) получено через бесселевы функции. Анализ показывает, что корни функции $J_1(\mu_n r)$ образуют возрастающую последовательность чисел $\mu_1 r$, $\mu_2 r$ и т.д. Если $\mu_1 r < 3,83$, то при $z \rightarrow \infty$ в трубе устанавливается параллельный режим течения, не зависящий от z . При $k > \mu_n$ течение становится периодическим или почти периодическим по длине канала. Возвратное течение на оси возникает при $\frac{\beta}{k} \approx \frac{k_0 V_{z0}}{2 [k_0 - 2 J_1(k_0)]}$; $k_0 = k R_0$.

Тангенциальный ввод жидкости является не единственной причиной возникновения возвратного течения. Решая основную систему уравнений без ограничений о тангенциальности ввода, но при наличии неравновесности, как и выше в форме $\omega_\varphi = -\alpha \cdot r$, можно

$$\text{получить} \quad \alpha = \frac{\Delta P}{0.5 \rho V_{z0}^2} = \frac{k_0^2 J(k_0) \delta}{k_0 - 2 J_1(k_0)}, \quad (13)$$

где положено $\delta = R^2 / R_0^2$.

Числитель (13) представляет собой избыток давления на стенке канала относительно оси, обусловленный неравновесным входом, а знаменатель - скоростной напор, создаваемый осевой скоростью потока. Если $R \cong R_0$ (ввод жидкости осуществляется у внутренней ее стенки), то $\delta = 1$, и при $k_0 \rightarrow 0$ значение (13) стремится к 4, т.е. $\alpha = \Delta P / 0.5 \rho V_{z0}^2 = 4$. Это означает, что обратный ток может возникать и без вращения, если избыток давления у стенки трубы против равновесного превосходит учетверенный скоростной напор.

Проведены теоретические исследования разделительного процесса гетерогенных систем с помощью гидроциклонных сепараторов. Задача рассматривалась в классической и стохастической постановках. При первом подходе задача применительно к скважинным условиям формулируется следующим образом. Суспензия, состоящая из дисперсионной среды и дисперсной фазы в виде частиц одинакового размера, совершает спиралеобразное однородное и изотропное вращательно - поступательное движение с угловой частотой ω в канале цилиндрической формы с внутренним и наружным радиусами соответственно R_1 и R_2 (для канала круглого сечения $R_1=0$). Если во вращающейся с той же угловой частотой ω цилиндрической системе координат ось z направить по оси вращения, радиальную координату \bar{R} отсчитывать в плоскости, ей перпендикулярной, полярный угол φ - в той же плоскости против часовой стрелки, скорость суспензии обозначить через \vec{V} , ее проекции: U - на ось z , V - на радиус-вектор \vec{R} , W - на касательную к окружности, то для сечения, удаленного от входа струи настолько, что движение во времени можно считать установившимся, уравнение движения для твердой и жидкой фаз из условия неразрывности можно представить в виде

$$RU_p \frac{\partial C}{\partial z} + RV_p \frac{\partial C}{\partial R} = 0; \quad \frac{RU_f \partial(1-C)}{\partial z} + \frac{RV_f \partial(1-C)}{\partial R} = 0, \quad (14)$$

где C - концентрация твердой фазы в суспензии, а индексы p и f относятся соответственно к частицам твердой фазы и жидкости.

Мгновенная скорость в данной точке согласно Рейнольдсу представлена как сумма осредненной во времени составляющей \bar{V} и турбулентной составляющей $\vec{V} = \bar{V} + \vec{V}'$. Это же положение распространяется и на концентрацию твердой фазы в турбулентном потоке $C = \bar{C} + C'$. Пульсационные составляющие скоростей \bar{V}'_p и \bar{V}'_f определены через коэффициенты турбулентной диффузии для твердой и жидкой фаз D_p и D_f согласно соотношениям $D_p = \bar{l} \bar{V}'_p$; $D_f = \bar{l} \bar{V}'_f$, где l - длина пути смешения в турбулентном потоке по Прандтлю. Если частицы мельче самых мелких турбулентных вихрей, то V'_p и V'_f мало отличаются друг от друга и от средней пульсационной скорости, и решение задачи существенно упрощается.

Задача решалась для двух случаев: отсутствии и наличии радиального уноса суспензии (соответственно стенки скважины непроницаемы и проницаемы) и для двух моделей вращательного движения: квазитвердого с постоянной угловой частотой ω и с угловой частотой, зависящей от радиуса вращения. При отсутствии радиального уноса решения для обеих моделей получены в замкнутой форме.

Начальная объемная концентрация твердой фазы в суспензии определялась как $C_0 = \rho_s / (\rho_s + m \rho_w)$, где m - водоцементное отношение; ρ_w и ρ_s - плотность воды и цемента. Отсюда для $m = 0,5$ получаем $C_0 = 0,3846$, а для $m_{min} = 0,25$ - предельно возможную концентрацию твердой фазы в суспензии $C_{np} = 0,5556$. Поэтому если в расчетах получалось $C > C_{np}$, то дальнейшие расчеты прекращались как не соответствующие действительности. С учетом этой особенности адекватная формула разделительного процесса представлена в виде

$$C = \frac{C_0 \exp B \delta(C_{np} - C)}{1 + C_0 (\exp B - 1)} + C_{np} \delta(C - C_{np}), \quad (15)$$

где $B = \frac{1600 V_0 r_0^2 (\rho_p - \rho_f) (R^2 - R_T^2)}{9 \eta R_2 (R_0^2 + R_T^2) (R_0^2 + R^2)}$; $\delta(C_{np} - C)$ - дельта - функция Дирака;

r_0 - радиус частиц; V_0 - скорость ввода суспензии в камеру; ρ_p и ρ_f - плотность твердой и жидкой фазы соответственно; η - вязкость среды; R и R_T - радиус текущий и выхода тангенциальных каналов.

Была составлена программа для расчета $C(R)$ для камер круглого и кольцевого сечения для обеих моделей, а также для определения радиуса достижения исходной R_{co} и предельной R_{np} концентрации и построены графики для $V_0 = 20, 35$ и 50 м/с и $r_0 = 5, 10, 25, 50$ и 75 мкм. Из них следует, что с увеличением V_0 и r_0 разделительный процесс интенсифицируется, причем влияние r_0 на процесс значительно сильнее, чем V_0 . Частицы размером 5 мкм оказываются как бы привязанными к жидкости и движутся вместе с ней. Заметное разделение начинается с частиц размером в 10 мкм, а для частиц размером $25 \dots 75$ мкм процесс идет интенсивно даже при малых скоростях ввода суспензии.

При квазитвердом вращении (в центрифугах) процесс идет эффективнее в сравнении с вращением с переменной частотой. Он интенсифицируется также с уменьшением R_7 .

При учете проницаемости стенок уравнение приводится к уравнению Риккати, решение которого в явном виде неизвестно. Поэтому производилось численное решение его при соответствующим образом сформулированных граничных условиях. По результатам расчетов построены аналогичные графики зависимостей для пластов с различной характеристикой. Ранее полученные закономерности процесса сохраняются и для этой задачи. Кроме того, получено, что с увеличением проницаемости интенсивность разделительного процесса несколько снижается.

При стохастическом подходе можно пренебречь конкретным видом взаимодействия и учитывать лишь вероятностный характер сил, действующих на частицы твердой фазы. Это приводит к кинетическому уравнению Фоккера-Планка-Колмогорова (уравнению ФПК), в котором вероятность случайного блуждания частиц в пространстве и времени отождествляется естественным образом с концентрацией частиц в суспензии.

Отождествляя объёмную концентрацию частиц с плотностью вероятностей, уравнение для концентрации $C(r, t)$ твердой фазы можно представить в виде

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\alpha r - \frac{\gamma - \gamma_0}{r} + \frac{\beta}{r^3} \right) C \right] - \frac{\partial}{\partial z} (V_z C) + \frac{D}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C}{\partial r} \right) + f(\bar{r}, t), \quad (16)$$

где $\alpha = m\omega^2 R_1^4 / \Phi_\eta (R_2^2 - R_1^2)^2$; $\beta = m\omega^2 R_1^4 R_2^4 / \Phi_\eta (R_2^2 - R_1^2)^2$; $\gamma = 2m\omega^2 R_1^4 R_2^2 / \Phi_\eta (R_2^2 - R_1^2)^2$;

R_1 и R_2 – внутренний и наружный радиус кольца (для круглой трубы $R_1 = 0$);

Φ_η -функция вязкости, которая может быть и линейная, и нелинейная $[MT^{-1}]$; $\gamma_0 = V_0 R_1$;

V_0 - средняя скорость суспензии, вводимой в камеру; r – текущий радиус;

m – средняя масса частицы твердой фазы; D – коэффициент диффузии, учитывающий случайный характер блуждания и столкновения частиц;

$f(\bar{r}, t)$ – функция источника, в отсутствии которого (16) превращается в однородное.

Путем перехода к безразмерным переменным и разложения по собственным значениям функции, а также ряда замен и подстановок однородное уравнение можно перевести в уравнение Уиттекера, общее решение которого выражается через вырожденные гипергеометрические функции, представимые в виде степенного ряда. Возвращаясь к переменной x и используя граничные условия при $x = x_1$ и $x = x_2$, получим трансцендентное уравнение для определения собственных значений функции.

Решение неоднородного уравнения (16) найдено путем разложения $f(x)$ в интервале (x_1, x_2) по собственным функциям однородного уравнения. Из полученных решений (которые из-за громоздкости здесь не приведены) следует, что концентрация твёрдой фазы $C(R)$ и плотность раствора в любом сечении $x \neq x_1$ растут во времени по экспоненциальному закону. При $x = x_1$ концентрация равна $C(x_1, \bar{t}) = C_0$.

Были проведены расчеты собственных значений для различных сочетаний параметров, входящих в уравнение. Из них следует, что характер изменения $C(R)$ сохраняется, а ее численные значения отличаются от результатов, полученных классическим методом, на 30...35%. Максимальное отличие в отдельных точках не превышает двух раз. Время достижения предельной концентрации в зависимости от значений основных параметров (когда она достигается) составляет от нескольких *мс* до нескольких десятков *мс*.

Таким образом, интенсивно закрученным потокам присущ ряд особенностей, главной из которых является возникновение поля центробежных массовых сил, что приводит к появлению радиального градиента давления и зоны обратных токов. Эти особенности в наибольшей мере соответствуют потребностям изоляции пластов отверждаемыми тампонажными составами на основе цементов: поле центробежных сил оттесняет поток к периферии, наличие радиального градиента давления подавляет вовлечение жидкостей из окружающего пространства в скважину, работая наподобие известных вихревых клапанов. Кроме того, это позволяет осуществлять центробежную сепарацию растворов с получением фаз большей и меньшей плотности, при которой сгущенная фаза направляется в пласт, а фаза с малой плотностью - выше зоны тампонирувания, чему способствует возникновение зоны обратных токов. Закрученный поток способен затекать в каверны, теневые и застойные зоны, вымывая из них буровой раствор. В этом смысле он работает как вязкоупругая система или эластичный поршень, площадь которого "повторяет" конфигурацию поперечного сечения ствола скважины. Поэтому вытеснение из него бурового раствора вращающимся потоком тампонажного раствора будет полнее, что может быть оценено по изменению коэффициента вытеснения $K_{\text{выт}}$, раствор будет меньше подвергаться загрязнению.

В работе приведен расчет возможных пределов изменения $K_{\text{выт}}$. При этом использованы результаты экспериментальных исследований внутренних закрученных потоков, полученные Щукиным В.К. и Халатовым А.А. Правомерность их использования обоснована на основе анализа условий проведения экспериментов с последующим приложением теории подобия. Путем прослеживания за осевой скоростью интенсивно закрученного потока по длине канала подобрана эмпирическая формула $V_z = V_z(\bar{z}, \bar{r})$. С ее помощью вычислялся объем фигуры вращения, основанием которой является плоское кольцо между стенкой трубы и областью обратного тока, а высота определяется наиболее продвинутыми к данному моменту времени слоями жидкости.

Коэффициент вытеснения вычислялся как отношение объема фигуры вращения к объему цилиндра с теми же основанием и высотой.

Расчеты показали следующее. Вначале, до $\bar{z} \approx 69$ ($\bar{z} = z/D$), $K_{\text{выт}}$ увеличивается до $\approx 92\%$, а затем несколько уменьшается. Темп снижения $K_{\text{выт}}$ во всем исследованном интервале незначителен: с 92% при $\bar{z} = 69$ до 87% при $\bar{z} = 313$. Это означает, что

применяя интенсивную закрутку потока тампонажного раствора на выходе из – под труб (бурильных или обсадных), можно не менее чем в 1.5 раза, в сравнении с обычным способом, повысить $K_{выт}$, что является условием успешного разобщения пластов или установки качественных цементных мостов в скважинах.

Рассмотрена возможность использования интенсивно закрученных потоков для повышения устойчивости стенок скважины методом кольматационного упрочнения, а также для восстановления правильной геометрической формы стволов скважин в зонах образования каверн. Учитывая, что многолетнемерзлые породы характеризуются дефицитом минерального цемента, метод может быть полезным и при их прохождении.

В закрученном потоке могут возникать и другие эффекты, способствующие повышению эффективности изоляционных работ: более интенсивное диспергирование частиц с образованием новых, активных поверхностей, их ускоренная гидратация, повышение температуры, образование волнового поля и облегчение проникновения частиц в каналы соизмеримых размеров и более плотной упаковке их, лучшее агрегирование активированных частиц, импакционное закупоривание каналов, ускоренное протекание химических процессов и др. Благодаря им изоляционный экран должен получиться более плотным, равномерным, прочным и менее проницаемым.

В пятой главе рассмотрен вопрос разработки новых способов и технических средств для борьбы с поглощениями. Сформулированы требования к ним, проанализированы известные способы и устройства, отмечены их недостатки. Показано, что наиболее приемлемыми для скважинных условий являются устройства, работающие на принципе использования свойств интенсивно закрученных потоков, которые не требуют отдельного источника энергии, а используют энергию бурового раствора и максимально трансформируют ее в энергию вращательного потока или волнового поля, обладают способностью интенсивного массопереноса, малыми габаритными размерами, просты по конструкции и надежны в работе.

Поставленная задача может быть подразделена на разработку способов и устройств для:

- 1) волновой кольматации малопрочных пород;
- 2) вихревой кольматации и кольматационного упрочнения слабосвязанных пород;
- 3) изоляции зон поглощений тампонажными составами на основе цементов.

Известно, что при взаимодействии двух встречных или пересекающихся высокоскоростных струй в слившемся потоке образуется сложный трехмерный поток, амплитуда пульсационного давления $P_{ак}$ кратно возрастает, что объясняется резким ростом турбулизации слившегося потока в результате трансформации кинетической энергии в энергию акустического поля, причем осевая V_o , радиальная V_r и тангенциальная V_τ составляющие скорости и амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) волны зависят от угла встречи струй α . С увеличением α величина $P_{ак}$ растет, V_r уменьшается. Это позволяет управлять и АЧХ волны путем конструктивного решения волнового кольматаци-

тора, и величиной V_r для предупреждения разрушения малопрочных пород. Исходя из минимальной прочности пород месторождений Западной Сибири, в работе найдена допустимая скорость $V_r \cong 20 \text{ м/с}$, которая достаточна для размыва рыхлой корки и направленного транспортирования частиц кольматанта в поглощающие каналы. Начальная скорость струй при этом может составлять 100 и более м/с .

Совместно с Галиакбаровым В.Ф., Мавлютовым М.Р. и др. разработаны способ и конструкция волнового кольмататора, защищенные охранными документами. В работе приведены принципиальная схема, описание работы, АЧХ кольмататоров и параметров процесса, характерные осциллограммы и спектрограммы. Показано, что при этом в жидкости генерируется также акустическое поле, имеющее автоколебательную природу. Наличие V_r и акустического поля приводят к интенсификации транспортирования частиц и кольматации пласта в результате увода частиц и виброперемещений, при которых возрастает их проникающая способность, достигается сортировка и более плотная упаковка. Определена удельная энергия воздействия на стенки скважины как сумма удельных энергий акустической и скоростного напора $A_{\text{уд}}=1100\dots1700 \text{ кДж/м}^2$, что достаточна для эффективной волновой кольматации пород.

Кольмататор при работе располагается непосредственно над долотом.

Известно, что главной причиной обвалов (иногда поглощений) при бурении в рыхлых отложениях является дефицит связующего материала, что особенно характерно для многолетнемерзлых пород. Сохранение (или повышение) их устойчивости возможно, если подвергать стенки скважины приповерхностной кольматации с принудительным внедрением связующего в приствольный слой наподобие оштукатуривания неровной и пористой поверхности более плотным и прочным материалом, причем кольматация должна осуществляться за счет твердой фазы, принудительно отделяемой от бурового раствора, например, с помощью забойного сепаратора, размещенного над долотом.

В работе приведены схема и описание работы вихревого сепаратора-кольмататора. Он состоит из корпуса и двух встроенных узлов: сепарации и вихревого. Поток бурового раствора, выходя через тангенциальные окна завихрителя, получает интенсивное вращение. Часть раствора, обогащенная твердой фазой, проходя через тангенциальные окна насадков, закручивается вторично и выходит из сопел в виде кругового вихря, охватывая кольматацией определенный участок стенки скважины, а основной поток проходит к долоту и выполняет свои обычные функции, причем содержание твердой фазы в этом потоке будет ниже исходного. Благодаря тому, что вихревая струя наносит кольматант под острыми углами к стенке, оказывая как бы скользящее воздействие, предупреждаются явления отскока кольматанта, и внедрение его в каналы осуществляется по схеме импакции. Так как струя непрерывно вращается вокруг оси насадков, а насадки – вокруг оси скважины, обеспечивается круговой охват кольматацией всей

поверхности стенки скважины, а кольматационный слой наращивается постепенно, путем многократного „размазывания“ его по поверхности стенки скважины.

В работе приведен расчет основных характеристик устройства и параметров процесса, а также потребного массового расхода кольматанта в зависимости от толщины кольматационного слоя, механической скорости бурения и др. Вряде случаев может потребоваться дополнительный ввод кольматанта в раствор на устье.

Значительное место в работе уделено вопросу разработки способов и устройств для изоляции зон поглощений тампонажными составами на основе цементов, сформулированы требования к устройствам, которые в основном сводятся к следующим:

1) обеспечивать закрутку потока с требуемой интенсивностью, исходя из необходимой степени сепарации тампонажного раствора, создания регулируемой дополнительной репрессии на пласт, достаточной для обеспечения бокового режима нагнетания и предупреждения вовлечения жидкостей из ствола скважины и из пласта;

2) вписываться в габариты ствола скважины без ограничений, обеспечивать спуск на трубах и установку на любой требуемой глубине, а при необходимости – перемещать его по стволу скважины в процессе производства изоляционных работ;

3) быть простыми по конструкции, надежными в работе, технологичными в изготовлении и обеспечивать многократное использование.

На основе анализа завихрителей различных типов и конструкций сделан вывод о том, что наиболее приемлемыми для скважинных условий по своим характеристикам являются завихрители тангенциального типа, способные при своих малых габаритных размерах создавать сильно закрученные потоки.

Автором совместно с В.Ф.Галиакбаровым и М.Р.Мавлютовым созданы два варианта завихрителей, которые получили названия забойных гидроциклонных сепараторов ЗГЦС-1 и ЗГЦС-2 соответственно для некавернозных и кавернозных участков ствола скважины. ЗГЦС-2 в отличие от ЗГЦС-1 снабжен кожухом-юбкой для создания необходимых условий для осуществления разделительного процесса. Длина кожуха - юбки найдена из условия обеспечения необходимого времени на процесс сепарации в соответствии с оценочными расчетами. В диссертации приведено описание их конструкции и работы. В качестве показателей, характеризующих эффективность их работы, приняты коэффициенты сепарации раствора K_c и эжекции обедненной цементом суспензии K_3 , которые для данного типа устройства определяются экспериментально. С этой целью, а также для проверки работоспособности устройств, были созданы лабораторно - экспериментальные стенды, определяющие размеры которых были выбраны из условия обеспечения приближенного подобия (по критериям Рейнольдса Re и Фруда Fr). На стенде, смонтированном в лаборатории кафедры бурения УНИ, проверялась работоспособность устройств и определялся K_3 при работе на технической воде. Статистически значимое отличие K_3 от нуля свидетельствовало о работоспособ-

ности сепараторов. Испытание устройств при работе на цементном растворе осуществлялось на промышленном стенде, смонтированном в ЦКС Дюртюлинского УБР. Эксперименты заключались в тампонировании моделей пластов гранулярного и трещинного типов. Были изготовлены 3 варианта моделей гранулярного коллектора, отличающихся фракционным составом "песка": с диаметром частиц от 1.0 до 2.0 мм (модель I), 2.0...3.0 мм (модель II) и 3.0...4.0 мм (модель III), которые были получены ситовым методом, а также три варианта моделей трещинного коллектора в виде узких щелей размером 45×0,3 мм (модель IV), 45×0,5 мм (модель V) и 45×1,0 мм (модель VI) и длиной 150 мм, которые устанавливались горизонтально. В качестве показателя, характеризующего работоспособность устройств, была принята приемистость "пластов" C , а также качественный показатель "пласт закупорен", "не закупорен". Когда этот результат не достигался, за критерий эффективности принималось статистически значимое отличие значений C при тампонировании моделей с сепаратором и без него. В результате испытаний была доказана работоспособность устройств и правильность исходных предпосылок, заложенных в основу разработки нового способа изоляции зон поглощений и технических средств для осуществления способа.

В работе приведено описание экспериментальных установок - стендов, моделей поглощающих пластов, методики проведения и результатов экспериментов, а также результатов их статистической обработки.

Шестая глава посвящена экспериментальным исследованиям закрученных потоков, влияния интенсивной закрутки на свойства цементного раствора и камня и процесс тампонирования пластов.

Теоретические исследования вращающихся потоков, с каких бы позиций они ни проводились, в силу чрезвычайной сложности процесса возможны лишь для простейших случаев даже для вязких жидкостей. Ряд вопросов, касающихся влияния интенсивной закрутки на структуру потока, свойства цементного раствора и камня, из него сформировавшегося, закономерностей процесса и результатов тампонирования и др., могут быть исследованы лишь экспериментально. Кроме того, полученные выше результаты теоретических исследований нуждаются в экспериментальном подтверждении.

Вся совокупность вопросов при этом была подразделена на две группы относительно самостоятельных, хотя и в конечном счете взаимосвязанных вопросов:

- 1) исследование структуры интенсивно закрученных потоков воды и цементного раствора, влияния закрутки на свойства раствора и камня, из него сформировавшегося;
- 2) исследование процесса и результатов тампонирования поглощающих пластов цементными растворами, подвергнутыми интенсивной закрутке.

С целью решения этих задач был создан экспериментальный стенд, обеспечивающий приближенное моделирование указанных процессов, который был смонтирован в ЦКС Нефтекамского УБР ПО "Башнефть".

На основе π -теоремы рассмотрены условия подобия вращающихся потоков воды и цементного раствора, получены критерии подобия, установлены масштабы подобия, определены размеры модельной установки. Эксперименты проводились при значениях расхода воды $Q_в=13.0, 17.2$ и 22.8 л/с, а для цементного раствора $Q_{цр}=9.6, 14.2$ и 18.7 л/с.

В работе приведено описание стенда, измерительных зондов для исследования структуры потока и их размещения в вихревой камере, описаны методики проведения экспериментов и обработки их результатов, дана оценка погрешности измерений. Установлено, что вращательная скорость V_τ в камере и круглого, и кольцевого сечения вначале плавно увеличивается, на некотором безразмерном радиусе $r=r_0$ достигает максимума $V_{\tau max}$, затем вначале плавно, а у внутренней стенки резко снижается до нуля, $V_{\tau max}$ всегда располагается за серединой $r = 0.5$, в области $0,55 < r \leq 0,7$. С ростом скорости V_0 ввода жидкости $V_{\tau max}$ также растет, r_0 еще больше смещается за $r = 0.5$.

По экспериментальным данным получены формулы для определения вращательной скорости, статического от вращения давления по радиусу и высоте колонны. На основе статистического анализа установлена их адекватность.

С целью исследования влияния интенсивной закрутки на свойства раствора и камня у проб, отобранных с радиусов $r = 0.5; 0.7$ и 0.9 , измерялись растекаемость R , время начала $t_{н.схв.}$ и конца $t_{к.схв.}$ схватывания, пластическая прочность τ_0 , коэффициент сепарации K_c , а также плотность ρ (дополнительно на $r = 0,1$ и $0,3$) при различных $Q_{цр}$. Определялась также прочность цементного камня на изгиб $\sigma_{изг.}$. Все параметры, кроме τ_0 , определялись на стандартных приборах и по методикам, а τ_0 - с помощью специально созданного прибора с повышенной точностью. Произведена статистическая обработка, оценка погрешности измерений, для которых подобраны простые эмпирические зависимости, связывающие указанные параметры или с водоцементным отношением m , или с параметром крутки (критерием Фруда Fr). Приведены распределения ρ , R и τ_0 по радиусу камеры r . Из них следует, что с увеличением r значения ρ прогрессивно возрастают для камер обеих форм сечения, причем интенсивность ее роста с увеличением $Q_{цр}$ повышается. Для приосевой зоны с ростом $Q_{цр}$ значения ρ снижаются. При $r \approx 0,5$ значения ρ сближаются, R вдоль радиуса снижается по зависимости, близкой к линейной, возможно пересечение доверительных интервалов.

Для пластической прочности можно выделить две области: $0,5 < r < 0,7$, где τ_0 изменяется незначительно, и $0,7 < r < 1$, где ее изменение весьма значительное, особенно для $Q_{цр}=18,7$ л/с. По-видимому, это может быть ориентиром при выборе расхода тампонажного раствора при изоляции зон поглощений, особенно интенсивных.

Результаты экспериментов, обработанные методом наименьших квадратов, представлены в виде эмпирических зависимостей для наиболее важных (с точки зрения

тампонирования пласта) параметров. Так, τ_0 можно представить как функцию или от m , или от Fr в виде:

$$\tau_0 = 0,2266 \cdot \left(1 - \frac{0,124}{m}\right) \cdot 10^{\frac{1}{m}} \quad \text{или} \quad \tau_0 = a \cdot Fr^2 + b \cdot Fr + c. \quad (17)$$

Для рассматриваемого случая: $a=3,3767 \cdot 10^{-4}$; $b= - 0,337$; $c=119$. Для $r \geq 0,9$ увеличение τ_0 может составить более 20 раз в сравнении с τ_0 для исходного раствора.

Время начала схватывания $t_{н.схв}$ для обогащенного раствора уменьшается от 1...2% для $r = 0.5$ до 50...80 % для $r = 0,9$. Аналогично изменяется и $t_{к.схв}$. Их можно аппроксимировать функциями

$$t_{н.схв} = 3,51 - 6,56 \cdot m + 23,28 m^2, \text{ час}; \quad (18)$$

$$t_{к.схв} = -2,562 + 22,0 \cdot m + 2,122 \cdot m^2, \text{ час}. \quad (19)$$

Прочность цементного камня σ_u , сформировавшегося из проб сгущенного раствора, выше по сравнению с исходной. Максимальное увеличение ее в экспериментах составило 4,4 раза. Значения σ_u могут быть аппроксимированы простейшей экспонентой вида

$$\sigma_u = A \cdot \exp(1/m), \text{ МПа}, \quad (20)$$

где A - размерный коэффициент, численно равный единице.

Коэффициент сепарации K_c , который был определен как $K_c = (\rho_{об} - \rho_{исх}) / (\rho^* - \rho_{исх})$, где $\rho_{об}$, $\rho_{исх}$ и ρ^* - плотность раствора, обогащенного твердой фазой, исходного и предельно возможная, при достижении которой раствор теряет способность течь. K_c своим знаком и величиной показывает, что произошло: обогащение или обеднение твердой фазой и меру этого изменения. Крайние значения K_c были получены при наибольшем Q_{II} и составили 0.785...0.835, тогда как теоретически возможные значения равны - 2.285...1.0.

С целью более детального изучения природы происшедших изменений были исследованы структура и ряд других показателей цементного камня: объемная плотность, скорость продольных ультразвуковых волн, макропористость, субмикропористость, фазовый состав и плотность дефектов кристаллической решетки. Они показали, что имеются существенные различия в опытных образцах в сравнении с контрольными, и они направлены в сторону улучшения качества цементного камня.

Большое многообразие условий, в которых происходят поглощения и производится тампонирование пластов, удаленность объекта, относительно небольшое центробежное давление на фоне скважинного, которое необходимо регистрировать в ходе эксперимента и т.д., практически лишают возможности ставить "чистый эксперимент" в условиях скважины, в связи с чем возникает необходимость в экспериментальном исследовании этого процесса методом моделирования. Однако это является довольно сложной задачей не только в силу отмеченных причин, но и из-за появления ряда новых факторов, что связано с тем, что объект-модель становится доступным для непосредственного обозрения и исследования. Таковыми являются геометрические размеры объекта: толщина h и радиальная протяженность R пласта. Другие факторы: коллекторские (КХ) и фильтраци-

онные (ФХ) характеристики, глубина залегания пласта, индекс пластового давления, репрессия на пласт во время и по окончании процесса тампонирувания,- должны быть учтены соответствующим образом - из условия обеспечения подобия процессов. Из этих характеристик h и R , а также КХ и ФХ являются собственно характеристиками пласта, а последующие три также относятся к пласту, но они влияют на процесс и результат тампонирувания опосредованно - через параметры процесса.

В скважинных условиях h может изменяться от долей до десятков метров. На экспериментальном стенде, ограниченном по высоте, физически невозможно использовать пласты с большой h . Следовательно, необходимо установить приемлемую ее величину. Сказанное в еще большей мере относится к радиальной протяженности пласта, т.к. именно толщина изоляционного экрана и его качество в конечном счете будут определять успешность изоляционной операции. Необходимо также учитывать влияние дальней зоны. Эти факторы, естественным образом учитывающиеся в условиях любого реального пласта, требуют оценки и соответствующего учета в модели. Кроме перечисленных факторов, при создании моделей учтены размеры зерен породы и эффективный диаметр пор (или раскрытость каналов), нешаровидность зерен, водосодержание и др.

Рассмотрены условия подобия процессов, на основе π -теоремы получены критерии подобия, произведен детальный анализ и оценка пределов изменения каждого из факторов и критериев подобия для реального пласта, совместности и возможности их выполнения. В частности, показано, что помимо выполнения самих критериев, содержащих k и $C_{уд}$, должно обеспечиваться равенство последних для природы k_n , $C_{удn}$ и модели k_m , $C_{удm}$. В тех случаях, когда система, составленная из уравнений масштабов подобия, несовместна, найдены технические решения. Так, дальняя зона пласта - оригинала может быть заменена регулируемым гидросопротивлением (дресселем) в пласте – модели. При этом использованы дополнительные положения третьей теоремы о подобии сложных систем при наличии нелинейности, неоднородности, анизотропии и вероятностном характере свойств и процессов, что характерно для горных пород, разделительного процесса и тампонирувания пластов.

В работе приведено обоснование вида, формы, порометрических и фильтрационных характеристик модельных пластов. Толщина и радиальная протяженность моделей по результатам проработки различных вариантов приняты: $h = 100$ мм; внешний радиус контура фильтрации $R_n = 360$ мм и внутренний радиус $R_{вн} = 110$ мм (радиус скважины). В качестве пористого материала использованы кварцевый песок и галька с шаровидно-овальной формой зерен. Минимальный размер зерен песка определен из условия, чтобы в поровое пространство могли проникать частицы цемента. Были изготовлены 4 варианта модели гранулярного коллектора с размерами зерен: 1 - 1...2 мм; 2 - 2...3 мм; 3 - 3...4 мм и 4 - 4...6 мм и 4 варианта модели трещинного коллектора (5,6,7 и 8 модели) с раскрытостью щелей b соответственно $b = 1; 2; 3$ и 4 мм. По обе стороны щелей была

засыпана песчаная масса для обеспечения "мягкого" режима фильтрации. Фракционирование зернистого материала производилось ситовым методом, а плотная упаковка зерен – обработкой моделей на вибростоле. Фильтрационные характеристики моделей определялись экспериментально. В работе приведено описание моделей, схем линий обвязки применительно к процессам опрессовки, тампонирования и промывания их, методик выполнения этих работ. Приведены результаты экспериментов, методика и результаты их статистической обработки. Методики предусматривали оценку эффективности тампонирования пластов с использованием сепаратора и без него. Эффективность оценивалась по двум показателям: снижению фильтрационной характеристики модели через показатель $a_{y\delta} = C_{y\delta c} / C_{y\delta o}$ или по качественному признаку "пласт изолирован", и по повышению прочности изоляционного экрана через показатель $a_{\tau_0} = \Delta P_{nmc} / \Delta P_{nto}$, где ΔP_{nm} - перепад давления страгивания изоляционного экрана; $C_{y\delta o} = Q_{mo} / F_M \Delta P_{mc}$; $C_{y\delta c} = Q_{mc} / F_M \Delta P_{mcn}$; j – порядковый номер значений расхода раствора; $j=1, 2, 3$; индексы c и o означают тампонирование с сепаратором и без него. При тампонировании без сепаратора Q_{mo} и $C_{y\delta o}$ с ростом k возрастают, а ΔP_{nto} снижается.

Результаты тампонирования моделей 1 – 4 типов с использованием сепаратора приведены в табл.1, где ΔP_{mcn} - перепад давления на модель, равный центробежному давлению.

Таблица 1

Результаты тампонирования моделей 1 – 4 типов с использованием сепаратора

Параметры	Расход цементного раствора через аппарат, $\text{дм}^3/\text{с}$											
	9,6				14,2				18,7			
Модель	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
ΔP_{mcn} , МПа	0,300	0,287	0,255	0,217	0,790	0,728	0,640	0,560	1,410	1,370	1,150	0,970
Q_{mcn} , $\text{дм}^3/\text{с}$	0,00	0,250	0,950	2,710	0,00	0,00	0,190	1,820	0,00	0,00	0,00	0,00
$C_{y\delta c}$, $\text{м}/\text{сМПа}$	0,0	0,0978	0,393	1,1533	0,00	0,00	0,0770	0,760	0,00	0,00	0,00	0,00
ΔP_{nmc} , кПа	155,4	87,6	59,1	38,8	336,0	180,4	103,8	64,6	1204,0	684,2	458,9	271,4
$a_{y\delta j}$	0,00	0,330	0,587	0,771	0,00	0,00	0,115	0,508	0,00	0,00	0,00	0,00
$a_{\tau_0 j}$	3,16	2,94	2,78	2,55	6,83	6,05	4,92	4,25	24,5	23,0	21,8	17,9
τ_0 , Па	36,1	34,4	32,5	30,6	78,2	70,7	56,3	50,3	280,0	265,2	250,7	210,8

Как видно из таблицы, расход Q_{mcn} и удельная приемистость $C_{y\delta c}$ незатампонируемых моделей существенно ниже, чем таковые при обычном способе: $C_{y\delta c}$ снизилась от незначительной до нуля, причем наибольший эффект достигнут при наибольшем $Q_{y\delta}$. Степень снижения $C_{y\delta c}$ зависит от k_m , снижаясь с ее увеличением.

С увеличением $Q_{y\delta}$ перепады давления на модели растут, но с увеличением k они несколько снижаются. Это говорит о том, что невозможно на пласт создать перепад давления, не зависящий от его проницаемости. Оно связано с отводом части жидкости в

пласт, и в этом смысле напоминает движение жидкости в пористой трубе.

С позиций успешности изоляции пласта наиболее важна прочность изоляционного экрана сразу же по окончании процесса тампонирования. В зависимости от k и Q_u увеличение $a_{\tau_{0j}}$ составило от 2,55 до 24,5 раз, причем эффективность тампонирования по этому показателю растет с увеличением k . Эксперименты по одновременному тампонированию всех моделей показали, что $\Delta P_{мсп}$ снизился еще больше: он стал меньше наименьшего из значений предыдущих опытов. Это явилось следствием того, что суммарный расход раствора через все модели стал больше наибольшего из расходов при отдельном тампонировании, и процесс сепарации несколько ухудшился. Это привело к снижению τ_0 и $\Delta P_{нтс}$. Соответственно стал ниже и коэффициент $a_{\tau_{0j}}$.

Значительно труднее оказалась изоляция моделей пластов трещинного типа (модели 5...8 вариантов). При обычном способе тампонирования ни в одном случае полной закупорки щелей не было достигнуто, хотя расход Q_m через 5 модель незначителен. Режим и результаты тампонирования этих моделей с использованием сепаратора приведены в табл.2. Смысл и порядок изменения $\Delta P_{мсп}$ при этом те же, что и в табл.1.

Таблица 2

Результаты тампонирования моделей 5 – 8 типов с использованием сепаратора

Параметры	Расход цементного раствора через аппарат, $дм^3/с$											
	9,6				14,2				18,7			
Модель	5	6	7	8	5	6	7	8	5	6	7	8
$\Delta P_{мсп}, МПа$	0,30	0,29	0,28	0,27	0,70	0,66	0,62	0,58	1,40	1,33	1,26	1,20
$Q_{мсп}, дм^3/с$	0,411	1,529	3,661	6,468	0,365	1,3876	2,890	4,910	0,00	1,030	2,512	4,150
$C_{удс}, м/сМПа$	0,156	0,692	1,571	2,735	0,112	0,524	1,1615	2,090	0,00	0,399	0,940	1,608
$\Delta P_{нтс}, кПа$	26,2	12,3	7,52	5,30	53,8	27,7	17,5	11,8	201,1	96,2	57,4	39,4
$a_{удj}$	0,954	0,920	0,896	0,836	0,850	0,799	0,707	0,685	0,00	0,608	0,572	0,527
$a_{\tau_{0j}}$	3,03	2,82	2,60	2,48	6,81	6,35	6,06	5,51	23,28	22,1	19,86	18,41
$\tau_0, Па$	35,1	33,0	31,5	29,0	80,5	74,9	70,4	65,0	270,8	254,6	230,1	210,4

Лишь модель с минимальной раскрытостью был закупорен при максимальном расходе, но $C_{удс}$ во всех остальных случаях значительно снижалась. С увеличением b и $Q_{мсп}$, и $C_{удс}$ увеличались, $\Delta P_{мсп}$ несколько снизился. Степень влияния b на $C_{удс}$ зависит от Q_u , но влияние это в целом не столь значительно. Увеличение $Q_{мсп}$ и $C_{удс}$ не пропорционально ни первой, ни второй степени b . Эти зависимости осложнены влиянием τ_0 раствора на процесс фильтрации.

С увеличением Q_u эффективность сепарации растёт, однако с увеличением b она снижается, что отражается через меньшие значения τ_0 раствора. Для трещинного канала

перепад давления страгивания ΔP_{nmc} мал. Величина его и соответственно $a_{\tau_{oj}}$ возрастают с увеличением Fr , но снижается с увеличением b примерно обратно пропорционально ей. При увеличении Q_m с 9,6 до 18,7 $\text{дм}^3/\text{с}$ $a_{\tau_{oj}}$ увеличилась от 2,48...3,03 до 18,41...23,28 раз. При расходе 18,7 $\text{дм}^3/\text{с}$ с увеличением b от 1 до 4 мм $a_{\tau_{oj}}$ снизилась от 23,08 до 18,41 раз. В абсолютных значениях ΔP_{nmc} в последнем случае составила $\cong 0,04$ МПа для $b=4$ мм и 0,201 МПа для $b=1$ мм, что для реального пласта эквивалентно перепаду давления соответственно 0,16 и 0,80 МПа. Если учесть, что при обычном способе ΔP_{nmo} составил всего лишь 0,00214...0,00864 МПа, то эффективность способа тампонирования с сепаратором не вызывает сомнений. Все происшедшие изменения при тампонировании с сепаратором можно проследить по табл.1 и 2.

С целью визуального осмотра и определения глубины и характера проникновения раствора модели гранулярного коллектора, когда была достигнута их изоляция, после ОЗЦ изучались вскрытием.

На основе статистической обработки данных предложена полуэмпирическая формула для определения расхода ВПЖ через трещинный коллектор при известной репрессии на него, которая приведена в работе.

В работе рассмотрены также дополнительные меры по повышению эффективности тампонирования пластов с использованием сепараторов, в частности, путем ввода в смесь наполнителей (лучше активных) расчетного фракционного состава и с плотностью, выше плотности воды затворения, ускорителей схватывания и т.д. Рассмотрены соответствующие задачи.

ЗГЦС защищены патентами РФ, США, Англии и ряда других стран.

В седьмой главе приведены технологии борьбы с поглощениями и оценка их экономической эффективности. Описана технология борьбы с поглощениями применением методов распознавания образов при автоматизированной разработке группового технического проекта строительства скважин на Абдрахмановской, Чишминской и Куакбашской площадях Ромашкинского месторождения. Для построения локальных областей были взяты данные по 150 скважинам. При этом группа из 10 скважин была взята как обучающая матрица векторов состояния. Прогноз ожидаемой сложности и прогнозная технология были разработаны для оставшихся 140 скважин массива. Использование способа позволило определить сложность ситуации с точностью не менее 80%. Это дает возможность ещё на этапе проектирования заложить в проекте технологию предупреждения и ликвидации поглощений.

Экономия в расчёте на одну скважину составила 1210 руб., а на 150 скважин соответственно – 181500 руб. (в ценах до 1991 г.).

Приведено описание технологии ликвидации осложнений с применением профильных перекрывателей, начиная с отбивки границ зон поглощений до спуска и установки

профильных труб с последующим контролем качества их установки.

Применение перекрывателей рекомендуется лишь тогда, когда будет установлена невозможность или неэффективность изоляции зон поглощений традиционными методами, для чего определяются характеристики (удельная приемистость, поперечные сечения каналов поглощения, особенно у наиболее крупных) поглощающих пластов.

В период с 1988 г. (с момента действия патента 1679030 РФ) по 2000 г. для борьбы с осложнениями при строительстве нефтяных и газовых скважин на нефтегазовых месторождениях ПО «Татнефть», «Башнефть», «Куйбышевнефть», «Оренбургнефть», «Удмуртнефть», «Пермнефть» и ПГО «Востсибнефтегазгеология», «Удмуртгеология», «Ямалнефтегазгеология» были использованы перекрыватели типов ОЛКС-216 и ОЛКС-216У (свыше 400 единиц) с высокой технико-экономической эффективностью. Их применение было вызвано необходимостью полной изоляции зон поглощений, представленных трещиновато-кавернозными породами. Общепринятые методы изоляции, включающие спуск хвостовиков или летучек, в таких пластах не дают положительного результата, вызывая в то же время перерасход труб и утяжеление конструкции скважины.

Экономический эффект достигнут благодаря экономии материалов и времени и определен по РД39-01/06-0001- 89" Методические рекомендации по комплексной оценке эффективности мероприятий, направленных на ускорение научно-технического прогресса в нефтяной промышленности". На использованный объем этот эффект составил 11983,4 тыс. руб. (в ценах 2000 г.). Доля, приходящаяся на соавтора Санникова Р.Х., составила 1198,34 тыс. руб.

Приведено описание технологии борьбы с осложнениями с применением волновой и вихревой кольматации малопрочных пород, основные этапы внедрения новой технологии и оценка их экономической эффективности. Эта технология отрабатывалась в условиях Варьеганского месторождения, характеризующегося переслаиванием малопрочных песчано-глинистых отложений, наличием газоносного сеноманского яруса, что вызывало почти все известные виды осложнений. С волновой кольматацией по разработанным стандартам были пробурены 180 скважин с высокими показателями. Позднее во многих буровых или научно-производственных предприятиях и организациях, в частности в ПО "Сургутнефтегаз", НПП "Азимут" и др. были разработаны варианты кольмататора: с измененными углами пересечения струй ("Сургутнефтегаз"), с расположением волновых насадков в горизонтальной плоскости (вертикальный веер), на двух уровнях (НПП "Азимут") и т.д., которые показали хорошие результаты.

В работе приведены условия и результаты применения способа волновой кольматации в различных предприятиях и организациях, из которых следует, что способ применялся для ликвидации и других видов осложнений. Во всех случаях был достигнут положительный результат. К настоящему времени с его использованием успешно пробурены тысячи скважин на различных месторождениях страны.

Прямой положительный эффект заключается в экономии материалов, времени и улучшении показателей бурения, а косвенный обусловлен сокращением сроков освоения скважин, увеличением их дебитов.

Фактический экономический эффект по 140 скважинам, утвержденный ПО "Варьеган-нефтегаз", составил 3669,38 тыс. руб., из которых на долю автора приходятся 782, 65 тыс. руб. (в ценах до 1991 г.. Утвержденный расчет прилагается).

Технология бурения с волновой кольматацией и волновой кольмататор защищены охранными документами.

В работе приведено описание технологии изоляции зон поглощений с применением сепараторов, начиная от подготовительных работ до опрессовки ствола скважины после разбурки цементного моста и оценки результатов изоляционной операции. Основными моментами при этом являются: отбивка границ и суммарной толщины поглощающих участков пласта, их удельной приемистости, раскрытости каналов, наличия, местоположения каверн и их размеров; выбор типа сепаратора, выбор типа и состава наполнителей; оценка потребного значения τ_0 ; определение объемов тампонажного раствора и продавочной жидкости, расхода их через сепаратор в процессе закачивания и продавливания; ускорителей схватывания, количества ЦА и СМН. Если наличные ЦА не могут развить требуемую производительность, то раствор может закачиваться с меньшим расходом при условии, что объем его меньше объема продавочной жидкости, и не будет разрыва сплошности его в трубах. Продавочная жидкость при этом будет закачиваться буровыми насосами с расходом не ниже расчетного. Для этого заранее готовится их нагнетательная линия, чтобы быстро подсоединиться к цементировочной головке.

В качестве исходной смеси используется раствор с $m = 0,5$. Предпочтение следует отдавать более низкосортным цементам, могут использоваться и лежалые цементы, предварительно просеянные через сито с соответствующими размерами ячеек.

Основное назначение способа изоляции с применением забойных сепараторов – это тампонирующее пластов с максимальной раскрытостью каналов поглощения до 1 мм при условии, что какие-либо ускорители схватывания или наполнители при этом (базовом варианте) не используются. Однако при использовании ускорителей схватывания и/или наполнителей область применения способа может быть расширена. Рекомендуемое количество ускорителя схватывания ($CaCl_2$) при этом составляет 5% по весу от объема раствора, который растворяется в воде затворения цемента, а наполнителя (лучше активного) до 20...30 % по весу цемента. Фракционный состав последнего определяется из условия $d_n = (0.33...0.5)b_{TP}$, где d_n и b_{TP} - диаметр (характерный размер) частиц наполнителя и раскрытость каналов поглощения. Максимальное значение d_n при этом не должно быть больше 1/3 меньшей стороны тангенциального окна сепаратора b_{oc} . Так как для разработанных ЗГЦС $b_{oc} = 6.24$ мм, то $d_n \leq 2.0$ мм. Следовательно, фракционный

состав наиболее крупноразмерного наполнителя может составлять $d_n \approx 1,37...2 \text{ мм}$.

Наполнители тщательно перемешиваются в бункере смесительной машины.

В качестве продавочной жидкости используется жидкость заполнения скважины.

Изоляционные работы проводятся: при полном поглощении - по мере вскрытия пласта, а при частичных поглощениях - после вскрытия его полностью.

Цементировочная техника - обычная, но могут потребоваться цементировочная головка, снабжённая быстросъёмными соединениями, и разделительные пробки.

Особую роль имеет выбор положения сепаратора. При пакерной заливке оно - стационарное, а при заливке через открытый конец труб может быть стационарное и подвижное.

Возможные варианты размещения сепаратора в зоне поглощения приведены в табл.3.

Таблица 3

Возможные варианты размещения сепаратора в зоне поглощения

Вариант	Толщина пласта (участков пласта) $l, \text{ м}$	Размещение сепаратора
1	$l < 3$	У кровли поглощающего пласта (участка пласта)
2	$3 \leq l \leq 25$	У подошвы поглощающего пласта (или самого нижнего участка) с последующим подъёмом с расчётной скоростью
3	$l > 25$	Поэтапно, с установкой по 1 варианту (при наличии забойного пакера) или 2 варианту (при его отсутствии) с разрывом или без разрыва во времени

Если сепаратор установлен по 1 варианту, то по окончании процесса инструмент поднимается, и скважина оставляется на ОЗЦ. Если тампонирующее ведётся по 2 варианту, то с началом прохождения головы цементного раствора через сепаратор он

поднимается со скоростью
$$V = \frac{Q_{ж.ф.}}{\pi \{ \kappa_k R_c^2 + [(\sqrt{\kappa_k} R_c)^2 - \kappa_k R_c^2] m_n a_1 \}}, \quad (21)$$

где $Q_{ж.ф.}$ - фактический расход жидкости в указанный момент; a_1 - коэффициент запаса;

κ_k и m_n - коэффициент кавернозности ствола скважины и пористость пласта.

Если тампонирующее ведётся по 3 варианту с разрывом во времени, то 1 этап его осуществляется как по 2 варианту, а 2 этап - как по первому. По окончании процесса инструмент поднимается, сепаратор промывается, и скважина оставляется на ОЗЦ.

В целях ускорения работ по выбору параметров тампонажного раствора и режима тампонирующего построена номограмма, которая приведена в работе.

Приведены основные этапы внедрения технологии изоляции зон поглощений с помощью забойных сепараторов и их технико-экономическая эффективность.

Первоначально технология изоляции зон поглощений с помощью забойных сепараторов отработывалась на площадях ПГО «Ухтанефтегазгеология», «ВостСибнефтегазгеология», ПО «Варьеганнефтегаз», «Башнефть» и некоторых других. При выборе объектов

руководствовались тем соображением, чтобы при ограниченном объеме испытаний охватить возможно большее число месторождений с различными геолого-техническими условиями и территориально расположенные в различных регионах страны. Несколько большее число испытаний было проведено в ПГО «Ухтанефтегазгеология», с которым работы проводились на договорной основе. Основные характеристики пластов изменялись в широких пределах: интервал поглощений от 458 до 2800 м, статические уровни от 30 до 190 м, интенсивность поглощений - от 15 до 100 м³/час. Испытания проводились в соответствии с выше описанными методическими положениями, оформленными в виде технологических инструкций. Сепараторы изготовлялись в условиях мастерских предприятий, т.к. это не требует специальных условий.

При раскрытости каналов до 2 мм заливки проводили чистым цементным раствором, а при большей раскрытости – с добавкой песка в количестве до 20 % к весу цемента. Во всех случаях было принято $m = 0,5$. В отдельных случаях добавляли хлористого кальция в количестве до 5% от веса сухого цемента. Глубина проникновения раствора в зависимости от ситуации принималась до 1,0 м.

Технико – экономический эффект при применении нового способа изоляции зон поглощений с использованием забойного сепаратора достигается благодаря сокращению материалов и времени, а также повышению качества стволов скважин. Величина экономического эффекта определялась по методике РД 39-3-79-78 ч.1, II,М,1978 г. "Методика определения экономической эффективности использования при строительстве скважин новой техники, изобретений и рационализаторских предложений".

Утвержденный ПГО «Ухтанефтегазгеология» экономический эффект составил 2347,36 тыс. руб., из которых на долю автора приходятся 586, 84 тыс. руб. Расчеты по другим скважинам своевременно утверждены не были и поэтому не учтены.

Утвержденный актами и расчетами экономический эффект использования способа волновой кольматации и изоляции с помощью забойного сепаратора по 10 скважинам ПГО "Гурьевнефтегазгеология" составил 979,369 тыс. руб., из которых на долю автора приходятся 326,46 тыс. руб.. Экономический эффект по кольматации и изоляции пластов по приведенным выше скважинам составил 3326,73 тыс. руб., из которых на долю автора приходятся 913, 30 тыс. руб. в ценах до 1991 г..

Суммарный экономический эффект, приходящийся на долю автора (по которым был произведен расчет), составил 913, 30 тыс. руб. в ценах до 1991 г. и 1198, 34 тыс. руб. в ценах 2000 г.

Основные выводы по работе

1. В деле диагностирования и прогнозирования поглощений и выбора стратегии их изоляции традиционно применяемыми тампонажными составами в условиях неполной определенности достаточно эффективными являются математические методы

распознавания образов в сочетании со специально разработанным алгоритмом, позволяющие широко использовать косвенные признаки пластов и скважин.

2. Решены задачи фильтрации вязко-пластичной жидкости в пластах, кольматации пластов твердой фазой бурового раствора, сепарации растворов в поле центробежных сил, найдены распределения давления и перепада давления по радиусу пласта в зависимости от глубины проникновения жидкости и ее свойств. Показано, что логарифмические законы, свойственные течению вязкой жидкости, искажены наложением составляющей перепада давления, обусловленного пластической прочностью структуры раствора τ_0 , и что исключить фильтрацию лишь созданием корки невозможно.

3. Для борьбы с поглощениями предложено использовать интенсивно закрученные потоки тампонажного раствора, которые детально исследованы аналитически и экспериментально на физических моделях пластов. Установлено, что они позволяют:

- предупреждать загрязнение тампонажного раствора буровым раствором и пластовой жидкостью;

- увеличить полноту вытеснения бурового раствора тампонажным из ствола скважины не менее чем в 1,5 раза;

- увеличить пластическую прочность структуры цементного раствора более 20 раз, сократить время начала и конца схватывания его до 80%, повысить прочность цементного камня до 4.4 раз;

- создавать на стенки скважины против поглощающего пласта регулируемое центробежное давление, обеспечивающее более выгодный – боковой режим нагнетания и более равномерное, фронтальное продвижение тампонажного раствора по пласту;

- изолировать поглощающие пласты не только гранулярного, но и трещинного типа.

4. Разработаны устройства для волновой и вихревой кольматации пород, а также забойные сепараторы цементного раствора, основанные на использовании эффектов сильно закрученных потоков, эффективность которых доказана лабораторными и промышленными испытаниями.

5. Разработаны технологии изоляции зон поглощений, основанные на применении методов: диагностирования, прогнозирования и выработки оптимальной стратегии, профильных перекрывателей, вихревой и волновой кольматации пород и забойной сепарации растворов. Для ускорения и облегчения работ по тампонированию пластов разработана номограмма, позволяющая оперативно определять параметры цементного раствора и добавок к нему, а также режим тампонирования.

6. Произведена оценка экономической эффективности внедрения разработок в производство и доля автора, которая составила 913, 30 тыс. руб. в ценах до 1991 г. и 1198, 34 тыс. руб. в ценах 2000 г.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах

Монографии и учебные пособия:

1. Технология бурения глубоких скважин: Учеб. пособие для вузов / М.Р. Мавлютов, Л. А. Алексеев, К.И.Вдовин, Г.В.Конесев, Л.М.Левинсон, П.Н.Матюшин, Р.Х. Санников, Р.М. Сакаев, Н.М.Филимонов. Под ред. М. Р. Мавлютова. – М.: Недра, 1982. – 287 с.
2. Tecnologia de perforacion de pozos profundos / M.R. Mavliutov, L. A. Aleksejev, R.H. Sannicov . Revisado por profesor M.R. Mavliutov. Editorial Mir, Moscu, 1986. – 287 p.
3. Технология бурения нефтяных и газовых скважин: Учебник для вузов / А.Н. Попов, А. И. Спивак, Т.О. Акбулатов, М.Р. Мавлютов, Р.Х. Санников, Л. А. Алексеев, Г. В.Конесев, Л. М.Левинсон, Ф. А.Агзамов, Х. И. Акчурин, Р. М.Сакаев, П.Н.Матюшин. Под общей редакцией А.И.Спивака. М.: Недра, 2003 г.– 509 с.
4. Технология бурения нефтяных и газовых скважин: Учебник для вузов/ А.Н. Попов, А. И. Спивак, Т.О. Акбулатов, М.Р. Мавлютов, Р.Х. Санников, Л. А. Алексеев, Г. В.Конесев, Л. М.Левинсон, Ф. А.Агзамов, Х. И. Акчурин, Р. М.Сакаев, П.Н.Матюшин. Под общей редакцией А.И.Спивака. Учебник для вузов – 2– е изд., испр. и доп.– М.: Недра, 2004 . – 509 с.
5. Методическое руководство по оперативному контролю и диагностированию осложненности условий проводки скважин в поглощающих пластах /А.Х. Мирзаджанзаде, М.Р. Мавлютов, Г.А.Ситдыков, В.Ф.Галиакбаров, Р.Х. Санников, И.М.Аметов, Р.Х.Ибатуллин, Р.Х.Фаткуллин. –Уфа:Уфим. нефт. ин–т, 1975.–138 с.
6. Санников Р.Х. Статистическая обработка промысловых данных: Учеб. пособие. – Уфа: Уфим. нефт. ин – т, 1978. – 82 с.
7. Санников Р.Х., Сакаев Р.М. Статистическая обработка промысловых данных: Учеб. пособие.-Уфа, 2001. – 76 с.
8. Санников Р.Х., Сакаев Р.М. Статистическая обработка промысловых данных: Учеб. пособие для вузов. – Уфа, 2003. – 77 с.
9. Санников Р.Х. Теория подобия и моделирование:Учеб. пособие.- Уфа, 2004.–154 с.
10. Санников Р.Х. Планирование инженерного эксперимента:Учеб. пособие. – Уфа, 2004. – 75 с.

Авторские свидетельства и патенты:

11. Пат. 11735 Великобритании, МКИ Е 21 В 7/00. Е 21 В 33/138, Е 21. В 43/38. A Method and Device for the Isolation of Intake Beds in Drill Holes /V.F. Galiakbarov, R.H. Sannikov, M.R.Mavlutov,etc. All of USSR, Ufa oil Institute.Published 19.05. 1987.
12. Пат. 4842066 США, МКИ Е 21 В 7/00: Е 21 В 33/138; Е 21 В 43/38. Method for isolation of intake beds in well holes and a device for carrying same into effect/V.F.

- Galiakbarov, R.H. Sannikov, M.R. Mavljutov, all of Ufa Oil Institute, USSR. Date of Patent: June 27.1989.
13. А.с. 1579972 СССР, МКИ Е 21В 10/18. Насадка бурового долота / В.Ф.Галиакбаров, Р.Х.Санников, И.Е. Котельников, М.Р. Мавлютов, А.Р. Оружев. Оpubл. 23.07.90, Б.И. №27.
 14. А.с. 1602976 СССР, МКИ Е 21 В 37/20.Способ снижения проницаемости слабосвязанных горных пород при сооружении скважины / Р.Х.Санников,В.Ф. Галиакбаров, М.Р. Мавлютов, Р.Р.Гилязетдинов,Р.А.Галиев.Оpubл.30.10.90, Б.И. №40.
 15. Пат. 10656 Федеральной Республики Нигерия, МКИ Е 21 В 33/13. Method of well constuction / R.S. Abdrachmanov; A.G. Zajnullin; R.H. Ibatullin, etc, all of Tatar Gosud. nauchno-issledovatel'sky I projektny institut; V. F. Galiakbarov, R. H. Sannikov, M. R.Mavljtov, all of Ufim'sky neft'noj institut: Date of Sealing 24.5.90.
 16. Пат. 3715398 ФРГ, МКИ Е 21 В 33/138. Verfahren and Einrichtung zur Isolierung von absorbierenden Schichten in Bohrlochern/Galiakbarov V.F, Sannikov, R. H, Mavlju-tov M.R; Ufim'sky neft'noj Institut, S.U. Anmildetag: 08.05.87; Offenbegunstug:1.12.88; Veroffentlichunstag der Patentertilung: 20.12.90.
 17. Пат. 4976322 США, МКИ Е 21 В 33/13. Method of construction of multiple – string wells / G.S. Abdrahmanov, A.G. Zainullin, etc. Tatnipineft; R.H. Sannikov, V.F. Galiakbarov, etc. Ufa Oil Institute, all of USSR. Date of Patent. Dec. 11.1990. US. Cl. 175/57; 166/207; 166/285; 166/380.
 18. Пат. 606777Австралии, МКИ Е 21 В 33/13. Merthod of constructing a well / G.S. Abdrachmanov, A.G. Zainullin, R.H. Sannikov, etc. (USSR) 1988. Dated 3.07. 1991.
 19. Пат.1301635 Канады, МКИ Е 21 В 33/13. Method of constructing a well/G.S. Abdrachmanov, R.H. Sannikov, etc. All of the USSR. 26.05.1992.
 20. Пат. 14939 КНР, МКИ Е 21 В 33/138. Method of multistring – well construction / G.S.Abdrahmanov, R.H. Sannikov, etc. (USSR). The date of Patent 1.07.92.
 21. Пат. 2530737 Японии, МКИ Е 21 В 33/138. Method of constructing the well / G.S. Abdrahmanov, A.G. Zainullin, R.Kh. Sannikov, etc. the USSR. Patented in Yuly, 1993.
 22. Пат. 13083 ПВПИ (Индия), МКИ Е 21 В 33/13. Method of well construction / Tatnipineft, Bugulma; Ufa Oil Institute, Ufa. Date of Patent 27. Aug, 1993.
 23. А.с. 1789668 СССР, МКИ Е 21 В 33/14 Устройство для изоляции зон поглощения промывочной жидкости /Р.Х.Санников, В.Ф.Галиакбаров, Р.А. Галиев, Р.С. Тукаев. Оpubл. Б.И. 23.01.93, № 3.
 24. Пат. 171802 Мексики, МКИ Е21В-0007/000. Un Metodo deconstruction de Pozos / G.S. Abdrachmanov, A.G. Zainullin, etc. Tatnipineft; M.R. Mavlutov, R.H. Sannikov, etc. Ufa. Oil Institute, all of USSR. Published 15.11.93. Official Gazette, V/1044, №3.

25. А.с. 1805208 СССР , МКИ Е 21 В 33/13. Устройство для изоляции зон поглощения промывочной жидкости / В.Ф. Галиакбаров, Р.Х. Санников, М.Р. Мавлютов, В.Д. Барановский, Р.А. Галиев, Р.Г. Сedaков. Оpubл. 30.03.93, Б.И. № 12.
26. Пат. 1679030 РФ, МКИ Е 21 В33/13. Способ изоляции зон осложнений в скважине профильными перекрывателями/Г.С. Абдрахманов, А.Г.Зайнуллин, Р.Х. Санников, Р.Х. Ибатуллин, И.Г. Юсупов, А.В. Перов, М.Р. Мавлютов, В.Ф. Галиакбаров, И.А.Уразгильдин. Оpubл. 10.03.93, Б.И. №7.
27. Пат. 2057927 РФ, МКИ Е 21 В 33/12. Способ определения местоположения и интенсивности зон поглощений / В.Ф. Галиакбаров, Р.Х. Санников, Н.М. Хлесткина. Оpubл. 10.04.96, Б.И. №10.
28. Пат. 300986 Норвегии, МКИ Е 21 В 33/13. Method of well constructing/G.S. Abdrachmanov, A.G. Zainullin, R.H. Sannikov,etc.The date of Patent: Yuly, 1996.
29. Пат. 0353309 ЕПВ, МКИ Е 21 В 33/13. Method of well constructing / G.S. Abdrachmanov, A.G. Zainullin, R. H. Sannikov, etc. (USSR); Manich, 05.02.97.
30. А.с. 1440121 СССР , МКИ Е 21 В 37/02.Устройство для сооружения скважины / В.Ф. Галиакбаров, Р.Х.Санников, М.Р. Мавлютов, Р.А.Галиев, А.Р.Оружев, Р.Г.Фаттахов, Т.И. Ибраев. Оpubл. 20.08.00, Б.И. № 23.
31. А.с. 1450448 СССР, МКИ Е 21В 43/00. Гидравлический генератор волн давления / В.Ф.Галиакбаров, Р.Х. Санников, Р.Р. Гилязетдинов. Оpubл. 20.08.00, Б.И. №23.
32. А.с. 1538587 СССР, МКИ Е 21В 43/00. Гидродинамический пульсатор давления / В.Ф. Галиакбаров, Р.Х.Санников, М.Р. Мавлютов, Р.Р. Гилязетдинов, Ф.М. Казырбаев, Р.С. Тукаев. Оpubл. 27.08.00. Б.И. №24.
33. СВИДЕТЕЛЬСТВО об официальной регистрации программы для ЭВМ №2002610301 «MEVAL ver. 1.0»/ Л.А. Латыпов, Д.Л. Алексеев, А.Я. Соловьев, Л.А. Алексеев, Р.Х. Санников. Зарегистрировано 01.03.02.

Статьи и тезисы докладов:

34. Санников Р.Х., Мавлютов М.Р. О моделировании работы бурильного инструмента // Изв. вузов. Сер. Нефть и газ. – 1969. - № 12. – С. 33 – 39.
35. Акбулатов Т.О., Ракша В.Ф. ,Санников Р.Х. Фильтрация растворов, содержащих твердую фазу, в пористую среду // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа.– 1983. – № 2. – М.: – С. 166 – 168.
36. Мавлютов М.Р., Галиакбаров В.Ф., Санников Р.Х. Технология бурения с управляемой гидродинамической вихревой кольматацией // Нефтяное хозяйство. – 1987. – № 6. – С. 10 – 14.

37. Санников Р.Х. Нахождение длины стесненной полуволны вращающейся колонны в наклонной скважине // Изв. вузов. Сер. Нефть и газ. – 1989.– №1. – С. 19 – 25.
38. Санников Р.Х. К уточнению методики расчета бурильной колонны // Изв. вузов. Сер. Нефть и газ. – 1990. – № 3. – С. 31 – 37.
39. Санников Р.Х. Пути улучшения вытеснения бурового раствора тампонажным при изоляции зон поглощений // Изв. вузов. Сер. Нефть и газ.– 1993.– № 1.– С. 25 – 30.
40. Санников Р.Х. Влияние различных факторов на определение фильтрационных характеристик пластов // Изв. вузов. Сер. Нефть и газ. – 2003 - №2. – С. 20 – 25.
41. Sannikov R.H. The kinetics of separation process of heterogeneous systems in a vortex chamber of hydrocyclone type //Intellectual Service for Oil and Gas Industry. Analysis, Solutions, Perspectives. 3d Volume.-USPTU, Miskols University.- Ufa, 2004.- P.60 - 71.
42. Санников Р.Х. Забойная сепарация тампонажного раствора с помощью аппарата гидроциклонного типа // Нефтегазовое дело. – Уфа, 2004. Т.2. – С. 337 – 349.
43. Санников Р.Х. К вопросу о гидродинамическом совершенстве структуры потока тампонажного раствора при изоляции зон поглощений: Межвуз. науч. – темат. сб. – Уфа:Уфим. нефт. ин-т, 1990. – С. 57 – 62.
44. Санников Р.Х. Некоторые теоретические аспекты закрученных потоков // Технология бурения н/г скв– н: Межвуз.науч.- темат. сб.– Уфа:Уфим.нефт.ин– т, 1991.– 8 с.
45. Санников Р.Х. О некоторых особенностях сильно закрученных потоков.// Физико-математич. проблемы и моделирование нефтепром. и нефтехим. процессов: Уфа: Межвуз. темат.сб.науч.тр.Уфим.нефт.ин – т.– 1992. – С. 163 – 166.
46. Санников Р.Х. Использование закрученных потоков для установки цементных мостов в скважинах // Проблемы нефтегаз. компл. России: Материалы Междунар. науч. – техн. конф.– Уфа,1998. – С. 34 – 35.
47. Санников Р.Х. Влияние интенсивного вращения на свойства цементного раствора и камня // Проблемы нефтегаз. компл. России: Материалы Междунар. науч. – техн. конф. – Уфа, 1998. – С. 234 – 235.
48. Санников Р.Х. Фильтрация вязко - пластичных жидкостей в пластах – коллекторах гранулярного типа // Наука и технология углеводородных дисперсных систем : Материалы II Междунар. симпозиума. – Уфа, 2000. – С. 99 – 100.
49. Санников Р.Х. Фильтрация вязко–пластичных жидкостей в пластах – коллекторах трещинно – кавернового типа // Наука и технология углеводородных дисперсных систем: Материалы II Междунар. симпозиума. – Уфа, 2000. – С. 83 – 84.
50. Санников Р.Х. Особенности моделирования поглощающих пластов и процесса их тампонирувания с применением забойных сепараторов // Проблемы нефти и газа: III конгресс нефтепромышленников России. – Уфа, 2001. – С.31 – 33.