

На правах рукописи



ШЕЛКОВНИКОВА Юлия Николаевна

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОМЫВКИ СКВАЖИНЫ ПРИ БУРЕНИИ ПОСРЕДСТВОМ КОНТРОЛЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БУРОВОГО РАСТВОРА

Специальность:

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (в науке и технике)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Ижевск - 2020

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т.Калашникова»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Тенев Валентин Алексеевич
ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова»

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Муравьева Елена Александровна
филиал ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Стерлитамаке, заведующая кафедрой «Автоматизированные технологические и информационные системы»

доктор технических наук, профессор
Марков Николай Григорьевич
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», профессор Отделения информационных технологий

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»

Защита состоится «17» декабря 2020 года в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.065.06 в ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова» по адресу: 426033, г.Ижевск, ул. 30 лет Победы, 2, корпус 5 ИжГТУ имени М.Т. Калашникова.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова», <http://istu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по адресу: 426069, г.Ижевск, ул.Студенческая, 7, ИжГТУ имени М.Т. Калашникова.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



В.Н. Сяктерев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время при строительстве скважин методом вращательного бурения важнейшим компонентом промывки скважины является буровой раствор (БР). Одним из основных критериев, обеспечивающих сокращение сроков строительства скважин, является качество БР, применяемого при проводке и промывке скважины. От качества и соответствия растворов геологическим условиям зависят скорость бурения, предотвращение аварий и осложнений, связанных с прихватами и устойчивостью стволов скважин, износостойкость бурового оборудования и инструмента, успешное цементирование и, в конечном счете, стоимость строительства скважин, а также их долговечность. БР оказывают большое влияние на все параметры как процесса бурения, так и ствола скважины в целом. Функции бурового раствора определяют не только успешность и скорость бурения, но и ввод скважины в эксплуатацию с максимальной продуктивностью. Поэтому вопросы повышения эффективности БР следует рассматривать комплексно с применением методик по управлению качеством строительства скважины.

Буровые растворы выполняют несколько основных функций: обеспечение непрерывной очистки забоя и ствола скважины от обломков выбуренной породы; охлаждение долота и других трущихся поверхностей; оказание противодействия на стенки скважины, что препятствует их обрушению и притоку в скважину воды, нефти или газа; а при турбинном бурении – обеспечивается передача гидравлической мощности турбобуру. Следует отметить, что основной задачей, решаемой применением БР при промывке скважины, является эффективный вынос шлама на поверхность.

Многие месторождения Удмуртии относятся к трудноизвлекаемым запасам нефти, поэтому тип БР для месторождений Удмуртии, его компонентный состав и границы возможного применения устанавливаются, в первую очередь, исходя из геологических условий. Кроме того, выбранные БР должны быть не только наиболее эффективными в данных условиях, но и их приготовление должно быть на основе доступных и дешевых реагентов и материалов. В нефтяных районах Удмуртии чаще всего встречаются песчаные и суглинистые почвы, а уровень грунтовых вод близок к поверхности. Поэтому применение БР обусловлено, прежде всего, обеспечением устойчивости стенки скважины путем коркообразования и способностью в период прекращения циркуляции удерживать во взвешенном состоянии частицы выбуренной породы, а также термостойкостью и способностью выдерживать определенные давления.

Под влиянием условий, которые складываются внутри скважины, свойства и состав бурового раствора меняются, что создает ряд проблем. Даже очень малые различия в химическом составе могут вызывать значительные изменения в функционировании системы промывки скважины. Большое влияние на параметры выноса шлама оказывают реологические свойства БР, на которые, в свою очередь, влияют высокие температура и давление, возникающие в скважине при бурении. Физически – повышение температуры уменьшает вязкость жидкой фазы; повышение давления – увеличивает плотность жидкой фазы, а, следовательно, и вязкость. Вследствие большого числа

переменных факторов, влияющих на реологические свойства БР, управлять их поведением при высоких температурах (особенно, растворов на водной основе) не всегда удается. Поэтому направление исследований, посвященное вопросам управления качеством промывки скважины при бурении посредством контроля и регулирования реологических характеристик бурового раствора, является актуальным.

Степень разработанности темы исследования

Вопросы исследования реологических свойств буровых растворов и управления ими в процессе промывки скважины при бурении рассматриваются в работах Гилязова Р.М., Булатова А.И., Макаренко П.П., Гукасова Н.А., Брюховецкого О.С., Чихоткина В.Ф., Рябченко В.И., Шарафутдиновой Р.З., Крылова В.И., Крецул В.В., Кудинова В.И., Чубик П.С., Кошелева В.Н., Корнева Е.Н., Аветисова А.Г., Сукурено Е.И., Гавриловой Л.В., Янковской Т.Н., Мирзаджанзаде А.Х., Городного В.Д., Ф.Роджерса и др.

Теоретическими и экспериментальными исследованиями реологических свойств буровых растворов занимались: Третьяк А.Я., Рыбальченко Ю.М., Леонов Е.Г., Исаев В.И., Бурдуковский Р.В., Осипов П.Ф., Иванников В.И., Миронова Е.В., Семенов Н.Я., Овчинников В.П., Менделеева Е.В., Уляшева Н.М., Ивачев Л.М. Аксенова Н.А., Салтыков В.В., Федосов Р.И., Пеньков А.И., Аветисян Н.Г., Пашинян Л.А., Шищенко Р.И., Паус К.Ф., Уокер Р.Э., Луммус Дж.Л., Маковой Н., Грей Дж.Р., Дарли Г.С.Г, Кистер Е.Г., Есьман Б.И., Уилкинсон У.Л. и др. Созданные ими теоретические положения, полученные и предложенные виды буровых растворов, устройства для определения их реологических свойств позволяют обеспечить повышение эффективности технологии промывки скважины. Анализ монографической и периодической литературы по проблематике диссертации показал, что вопросы управления качеством промывки скважины при бурении на основе контролируемых и регулируемых реологических характеристик бурового раствора недостаточно изучены.

Тематика работы соответствует п.2 «Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации», п.3 «Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации», п.4 «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации» паспорта специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации (в науке и технике)».

Объектом исследования является технологический процесс промывки скважины при бурении.

Предметом исследования являются методы и средства управления характеристиками бурового раствора.

Цель работы – разработка научно-обоснованных технических и методических решений для управления качеством промывки скважины при бурении на основе контроля и регулирования реологических характеристик бурового раствора, что способствует повышению эффективности бурения за счет создания благоприятных условий работы для породоразрушающего инструмента.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить анализ и определить основные показатели буровых растворов, влияющие на качество промывки скважины при бурении.
2. Разработать экспериментальную методику определения реологических характеристик бурового раствора – вязкости и предела текучести при переменных температурах и давлении.
3. Построить математическую модель неизотермичной гидродинамики бурового раствора в скважине, учитывающую его пластические свойства.
4. Разработать математическую модель и алгоритм оптимального управления качеством технологического процесса промывки скважины на основе контроля и регулирования реологических характеристик бурового раствора.

Методы исследования.

В диссертации использован комплексный метод, включающий теоретические и экспериментальные исследования. Работа выполнялась с применением математического моделирования, в теоретических исследованиях использовались методы системного анализа, численные методы. В экспериментальных исследованиях применялись теория измерения механических и электрических величин, статистические методы обработки результатов исследований.

Достоверность и обоснованность полученных в работе научно-технических результатов и выводов обеспечивается корректным применением апробированного математического аппарата и математически обоснованных численных методов при решении поставленных задач, основывается на данных натурных испытаний, использовании аттестованных измерительных средств, подтверждением теоретических результатов экспериментальными данными и результатами других авторов.

На защиту выносятся:

1. Предложенная экспериментальная методика установления типа бурового раствора как неньютоновской жидкости, основанная на виде связи между касательным напряжением и скоростью сдвига раствора.
2. Предложенная методика и устройство для определения реологических характеристик глинодержащего вязкопластического бурового раствора, обеспечивающие одновременное нахождение его вязкости и предела текучести при переменных температурах и давлениях.
3. Математическая модель гидродинамики бурового раствора в скважине в неизотермических условиях бурения, учитывающая пластические свойства раствора и обеспечивающая нахождение характеристик его течения при ламинарном и турбулентном режимах.
4. Математическая модель и алгоритм оптимального управления качеством технологического процесса промывки скважины на основе предложенного критерия – максимальной очистки забоя, обеспечиваемой контролем и регулированием значений реологических характеристик бурового раствора.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложена методика установления типа бурового раствора как неньютоновской жидкости, основанная на нахождении кривой его течения, связывающей касательное напряжение и скорость сдвига раствора.
2. Предложены экспериментальная методика и устройство для определе-

ния реологических характеристик глиносодержащего вязкопластического бурового раствора, обеспечивающие одновременное нахождение по предложенным формулам вязкости и предела текучести при переменных температурах и давлениях.

3. На основе численного решения вариационной задачи, описывающей гидродинамику бурового раствора в скважине в неизотермических условиях бурения, определены характеристики его течения при ламинарном и турбулентном режимах.

4. На основе предложенного критерия – максимальной очистки забоя, разработана математическая модель и алгоритм оптимального управления качеством технологического процесса промывки скважины при регулировании реологических характеристик бурового раствора.

Практическая полезность работы. Разработанные в диссертации методики позволяют решить задачи управления и оптимального бурения скважин. Предложенные решения обеспечивают повышение результативности и эффективности строительства скважин – увеличивается скорость бурения. За счет вовремя вынесенного шлама качественным буровым раствором при промывке скважины повышается безаварийность бурения и качество добываемой нефти.

Способы и устройство для экспериментального определения вязкости и предела текучести неньютоновской жидкости могут применяться для исследования реологических свойств буровых растворов при переменных температурах и давлениях.

Результаты диссертации могут быть также использованы в учебном процессе высшей школы при подготовке соответствующих специалистов.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на: пятой Российской университетско-академической научно-практической конференции (Ижевск, 2001), на научно-технических конференциях «Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства» (Ижевск, 2015); «Виртуальные и интеллектуальные системы» (Барнаул, 2016, 2018, 2019), «Информационные технологии в науке, промышленности и образовании» (Ижевск, 2020).

Публикации. Основное содержание диссертационной работы отражено в 17 публикациях, в том числе 3 патентах РФ, 7 статьях в журналах, рекомендуемых ВАК РФ для публикации основных результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата наук.

Личный вклад диссертанта заключается в непосредственном участии на всех этапах исследования, включающих создание методов и средств управления характеристиками бурового раствора, моделирование изучаемых процессов, разработку и реализацию методов решения задач оптимизации, создание системы управления качеством бурения в процессе промывки скважины посредством контроля параметров бурового раствора и анализа результатов.

Структура и объем работы. Структура и объем работы определяются общим замыслом и логикой проведения исследования. Диссертация содержит введение, 5 глав и заключение, изложенные на 159 стр. машинного текста. В работу включены 38 рис., 11 табл., список литературы из 145 наименований, приложение.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы, формулировку цели и задач работы, основные положения, выносимые на защиту, и определяет содержание и методы выполнения работы.

В первой главе представлен краткий обзор истории развития буровых растворов, анализируются работы, посвященные выбору типа и улучшению их качества. Дана классификация БР на водной основе, приведен обзор работ, посвященных исследованию их реологических свойств. Рассмотрены классические математические модели, отражающие идеальное поведение реальных тел. Представлена классификация БР по реологическим характеристикам, описаны устройства для их исследования при промывке скважины. Показана необходимость разработки новых методик управления свойствами БР, предложено использовать системный подход для оптимизации процесса промывки. В основе системного подхода лежит исследование объектов как систем. Для изучения технологического процесса промывки скважины (как объекта) ему в соответствие сопоставлена система со свойствами, характерными для гидродинамики бурового раствора в скважине (рис.1).

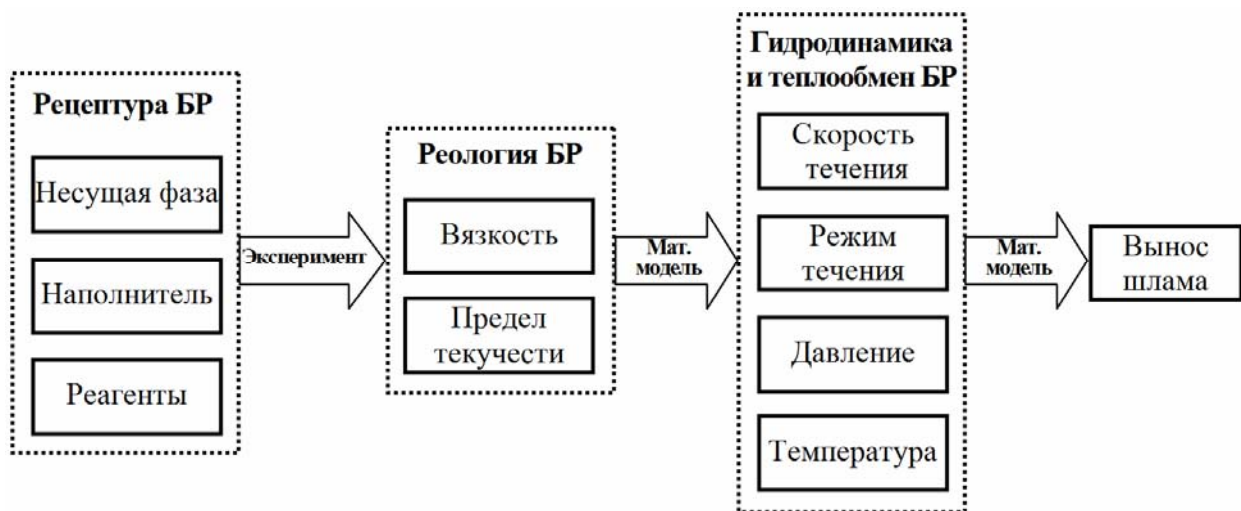


Рис.1. Схема системных связей процесса промывки скважины буровым раствором

Системный подход позволил выявить связи между составляющими элементами моделируемого технологического процесса промывки скважин БР и разработать математические модели этих составляющих более адекватными и объективными. Содержательная часть системных связей получена при проведении исследований в процессе выполнения диссертационной работы.

Даны выводы и постановка задач исследования.

Во второй главе изложены основные факторы, влияющие на состав буровых растворов, сформулированы требования к их качеству в зависимости от геологических условий и технических особенностей проходки скважин. Показано преимущество использования на месторождениях Удмуртии глинистых растворов (ГР) на основе глинопорошков, представлена методика их приготовления. Показано влияние вязкости глинистого раствора на скорость бурения (рис.2). Для качественной промывки скважины буровой раствор должен

обладать свойствами вязко-пластической жидкости, к которому относится исследуемый буровой раствор.

Разработана методика определения реологических характеристик неньютоновских жидкостей для установления типа исследуемой жидкости (вязкопластической, псевдопластической, дилатантной). Для течения в кольцевом канале (рис.3) установлены формулы для определения градиента скорости du/dy и касательных напряжений τ_w по данным, получаемым в результате эксперимента:

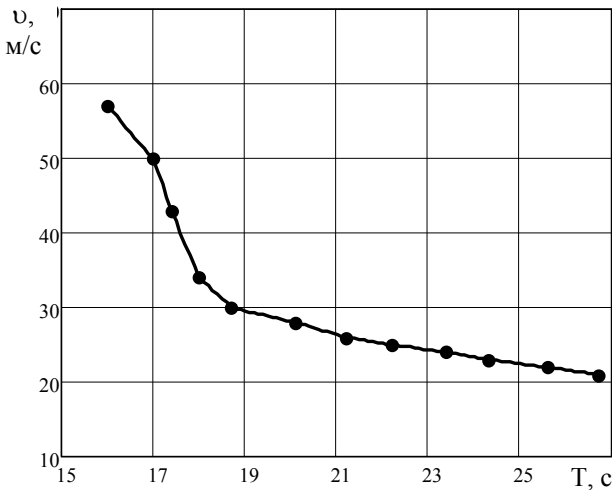


Рис. 2. Влияние вязкости глинистого раствора на скорость бурения

$$\begin{cases} \frac{du}{dy} = \frac{Q}{\pi Rh} + \frac{h\Delta p}{l} \frac{d\left(\frac{Q}{\pi Rh}\right)}{d\left(\frac{h\Delta p}{2l}\right)}; \\ \tau_w = \frac{h\Delta p}{2l}, \end{cases} \quad (1)$$

где Q – объемный расход жидкости; Δp – перепад давлений на концах капилляра; h – толщина кольцевого зазора; R , l – радиус и длина капилляра, соответственно.

Система (1) позволяет по полученным при проведении экспериментов значениям Q и ΔP построить кривую течения исследуемой неньютоновской жидкости в координатах $\dot{\gamma}$, τ (где $\dot{\gamma}$ – скорость деформации, вызванная касательным напряжением τ).

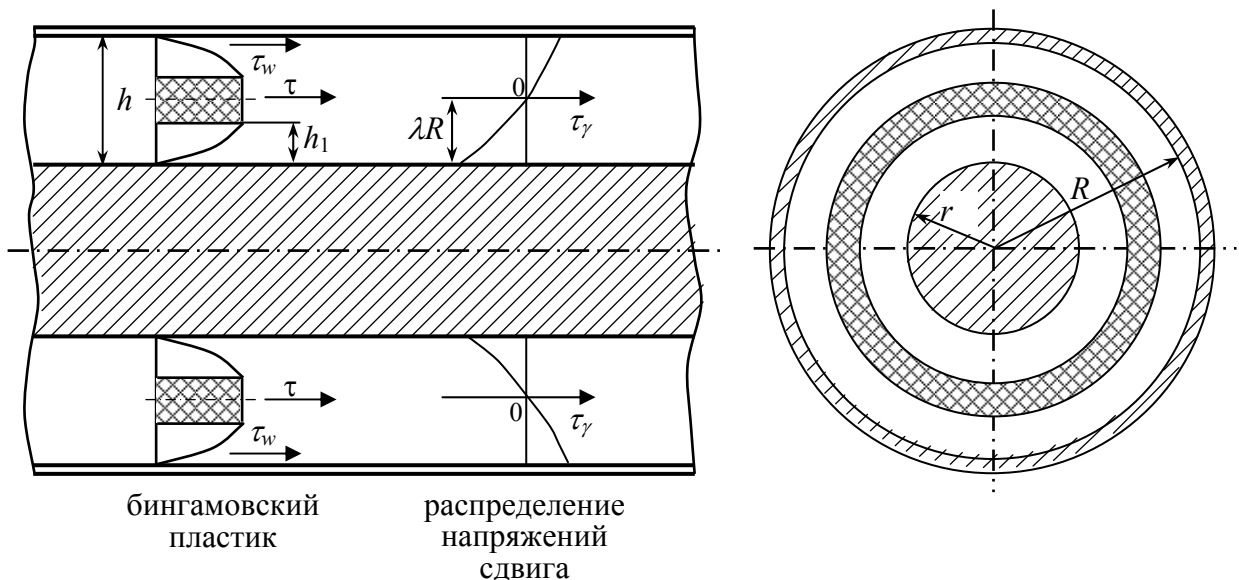


Рис. 3. Схема течения вязкопластической жидкости в кольцевом канале

На рис.4 приведены кривые течения для различных типов неньютоновских жидкостей. По виду кривой можно определить тип исследуемой жидкости.

Предложена методика и для измерения реологических свойств вязко-

пластических жидкостей, которая обеспечивает одновременное точное определение по предложенным формулам вязкости (2) и предела текучести (3) при достаточно простой конструкции установки для ее реализации:

$$\mu = \frac{\pi h^3 (2\Delta p_1^3 l_2^3 R + h\Delta p_1^3 l_2^3 - 2\Delta p_2^3 l_1^3 R - h\Delta p_2^3 l_1^3)}{12l_1 l_2 (Q_1 l_2^2 \Delta p_1^2 - Q_2 l_1^2 \Delta p_2^2)}; \quad (2)$$

$$\tau_s = \frac{[\Delta p^2 (2\pi\Delta p h^3 R - 12Q\mu l - \pi\Delta p h^4)(2R - h)]^{\frac{1}{3}}}{2\pi^{\frac{1}{3}} l (2R - h)}, \quad (3)$$

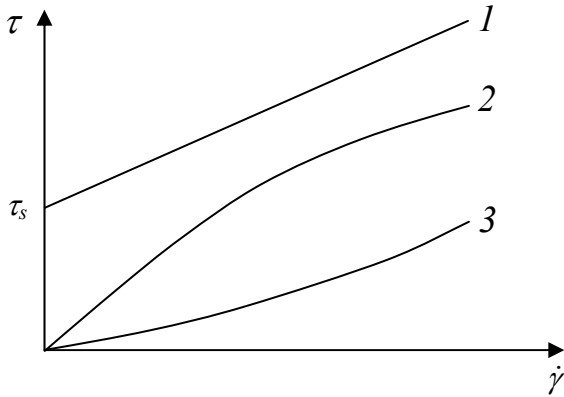


Рис. 4. Кривые течения различных типов неньютоновских жидкостей: 1 – бингамовский пластик; 2 – псевдо-пластичная; 3 – дилатантная

где μ – вязкость жидкости; τ_s – предел текучести; l_1 , l_2 и Δp_1 , Δp_2 – длина короткого и длинного капилляров и перепад давлений на их концах, соответственно; R – радиус внешней стенки капилляра кольцевого сечения; h – толщина слоя вязко-пластической жидкости в кольцевом канале; Q_1 , Q_2 – объемный расход жидкости для короткого и длинного капилляров. В качестве Δp , l и Q можно использовать данные, полученные для любого из используемых капилляров.

На рис.5 приведена схема устройства для реализации предложенной методики (где РЖ – резервуар с исследуемой жидкостью; СУ – силовая установка для обеспечения прокачивания жидкости через капилляры К1, К2 одинакового кольцевого сечения различной длины l_1, l_2 ; ВХК1, ВХК2 – входные камеры; ВК1, ВК2 – выходные камеры с измерителями расхода жидкости; ДМ1, ДМ2 – дифференциальные манометры (с электрическими выходами); МП – микропроцессор со встроенным аналого-цифровым преобразователем).

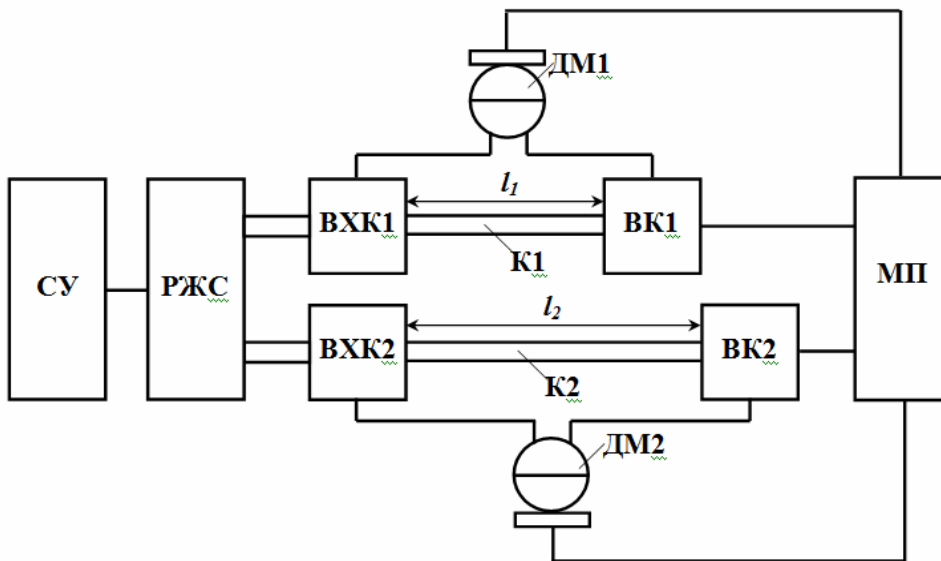


Рис. 5 Структурная схема устройства для определения реологических характеристик буровых растворов

На рис. 6а приведены построенные с использованием формул (2,3) графики зависимостей погрешностей определения вязкости бурового раствора от погрешностей изготовления капилляров (1, 2 – для короткого и длинного капилляров, соответственно), на рис. 6б – от толщины зазора (1) и радиуса (2) капилляров).

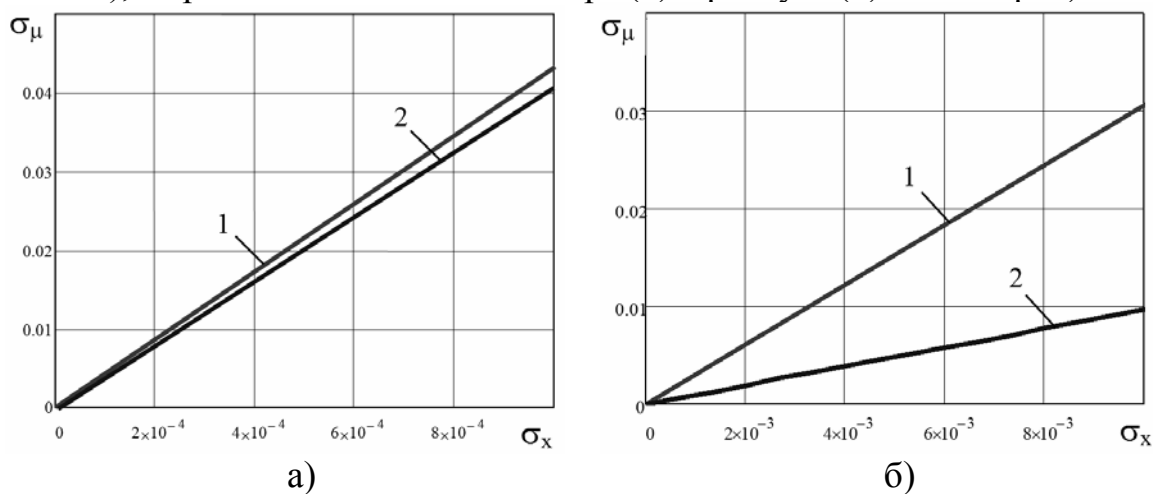


Рис.6. Зависимости погрешностей определения вязкости бурового раствора от погрешностей изготовления капилляров: а – длины капилляров; б – толщины зазора и радиуса капилляров

Из анализа графиков следует, что погрешность измерения реологических характеристик бурового раствора в значительной мере зависит от точности изготовления капилляров вискозиметра, которые определяются следующими геометрическими параметрами – длиной, толщиной кольцевого зазора и радиусом. Для обеспечения погрешности определения вязкости бурового раствора на уровне $\sim 3\text{-}5\%$ с применением предложенного вискозиметра необходимо обеспечить следующие погрешности при изготовлении капилляров: для длины – не более $\sim 0,1\%$, для толщины кольцевого зазора – $\sim 1,5\%$, для радиуса – $\sim 5\%$. Для определения предела текучести требования по точности изготовления капилляров значительно ниже, поэтому обеспечение вышеприведенной точности геометрических параметров капилляров является достаточной для определения обеих характеристик бурового раствора. На рис. 7 приведены графики зависимостей погрешностей определения вязкости бурового раствора от погрешностей датчиков давления и расхода раствора (1, 2 – для короткого и длинного капилляров, соответственно).

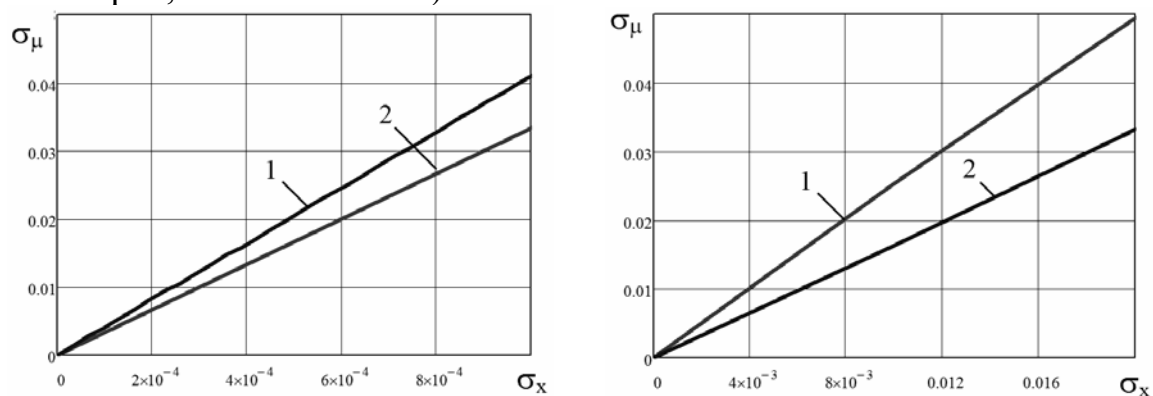


Рис.7. Зависимости погрешностей определения вязкости бурового раствора от погрешностей датчиков: а – давления; б – расхода жидкости

Анализ показал, что погрешность определения реологических характеристик бурового раствора в различной степени зависит от точности датчиков давления и расхода жидкости. Для обеспечения достаточно низкого уровня погрешностей определения вязкости бурового раствора на уровне $\sim 3-5\%$ погрешность измерения датчиков давления должна быть не более $\sim 0,1\%$, а датчиков расхода жидкости – $\sim 2\%$. Для определения предела текучести требования по точности к датчикам ниже (как и для случая с конструктивными параметрами), поэтому обеспечение вышеприведенной точности датчиков является достаточной для определения обеих характеристик бурового раствора.

Третья глава посвящена обоснованию и экспериментальному исследованию зависимости вязкости и предела текучести от температуры. Приведены описание используемого оборудования, методика проведения экспериментов, результаты статистической обработки экспериментальных данных и определения погрешностей. На основе полученных экспериментальных данных получена зависимость вязкости и предела текучести бурового раствора от температуры в виде уравнений регрессии с помощью метода наименьших квадратов. Проведен корреляционно-регрессионный анализ зависимости вязкости и предела текучести от давления при фиксированных температурах; выявлено, что в заданном диапазоне давлений (до 5 МПа) зависимости между ними не наблюдается.

Предложен новый капиллярный вискозиметр (КВ) (защищенный патентом РФ), позволяющий определять вязкость и предел текучести при переменных температуре и давлении (рис.8).

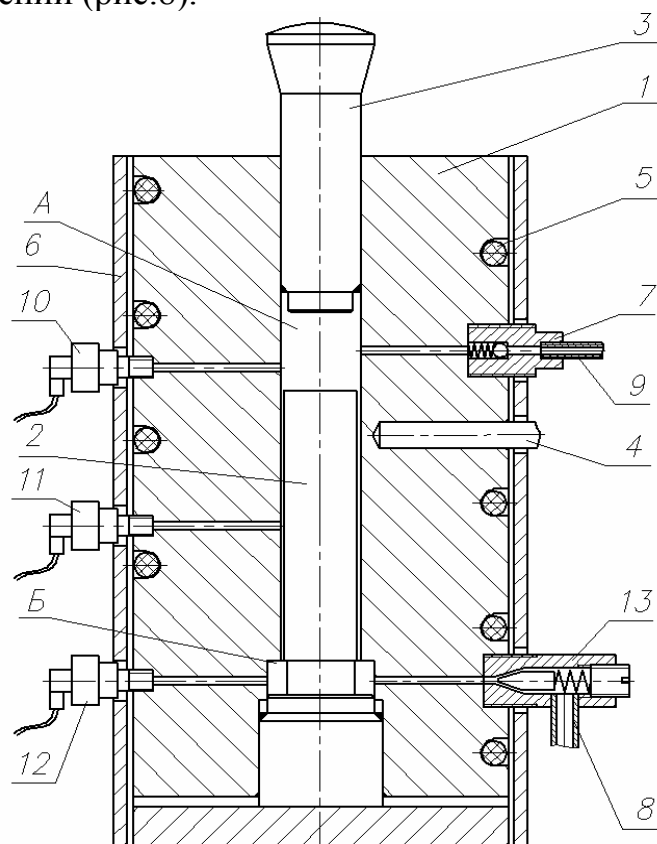


Рис. 8. Общий вид капиллярного вискозиметра (где 1 – корпус; 2 – стержень; 3 – плунжер; 4 – датчик температур; 5 – нагревательный элемент-спираль; 6 – теплоизоляционный кожух; 7– обратный клапан; 8 – сливная трубка; 9 – нагнетающая трубка; 10, 11, 12 – датчики давления; 13 – дроссель)

Устройство содержит узел контроля и поддержания заданной температуры, состоящий из датчика температуры 4, нагревательного элемента 5, теплоизоляционного кожуха 6. Выходное отверстие капилляра укомплектовано дросселем 13, настраиваемым на давление, при котором исследуется буровой раствор. Давление БР в полости А создается при движении плунжера 3 вниз. С помощью электронных датчиков 10, 11, 12 определяются величины давления жидкости по длине капилляра. Особенностью КВ является то, что капилляр выполнен в виде кольцевого зазора между цилиндрическим отверстием в корпусе 1 вискозиметра и расположенным внутри этого отверстия стержнем 2. Схема течения жидкости по такому капилляру наилучшим образом соответствует схеме течения бурового раствора при промывке скважины.

Описаны конструкция вискозиметра и принцип его работы, приведены выражения для определения необходимых реологических параметров исследуемой жидкости. Разработана методика проведения экспериментов по исследованию зависимости вязкости и предела текучести буровых растворов от температуры. Разработанный вискозиметр устанавливается на стол универсальной испытательной машины УИМ-50, на ползуне которой закрепляется плунжер вискозиметра. В качестве исследуемой жидкости был выбран глинистый БР на основе Куганакского глинопорошка с добавлением КМЦ (для смягчения воды была добавлена кальцинированная сода). Эксперименты проводились при температурах раствора 23°C , 50°C , 80°C . Внешний вид установки для проведения эксперимента представлен на рис. 9.

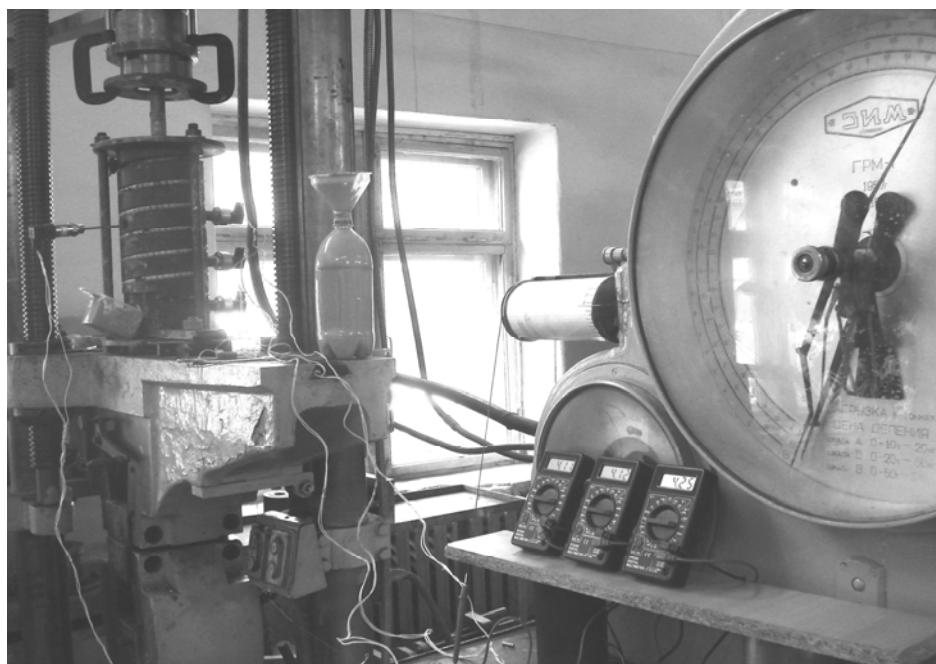


Рис. 9. Внешний вид установки для проведения эксперимента

Предлагаемый КВ позволяет определять вязкость и предел текучести раствора при переменных температурах и давлениях.

В результате обработки полученных экспериментальных данных с использованием метода наименьших квадратов были установлены функциональные зависимости вязкости и предела текучести от температуры. Проведен статистический анализ коэффициентов линейной модели, хорошо аппроксимирующей

экспериментальные данные: вязкость $\mu = (10,681 - 0,0565 \cdot t^\circ) \cdot 10^{-3}$; предел текучести $\tau_s = 8,2329 - 0,0366 \cdot t^\circ$.

Приведены результаты экспериментов по исследованию вязкости и предела текучести глинистого бурового раствора при переменных температурах и давлении.

В четвертой главе разработана математическая модель движения БР в скважине. Рассмотрены особенности течения глинистых буровых растворов в типовых конструкциях современной нефтяной скважины (рис.10), которые относятся к классу вязкопластических жидкостей. В них (наряду с вязкостью) проявляются пластические свойства, заключающиеся в наличии предела текучести, после достижения которого возникает текучесть среды.

Реологическое уравнение такой жидкости имеет вид:

$$\dot{\varepsilon} = -\frac{dw}{dr} = \begin{cases} \frac{\tau_u - \tau_s}{\mu} & \text{при } \tau_s < \tau_u < \tau_w; \\ 0 & \text{при } \tau_u \leq \tau_s, \end{cases} \quad (4)$$

где $\dot{\varepsilon}$ – скорость сдвига; τ_u – напряжение трения в любой точке; τ_s – предел текучести; μ – коэффициент динамической структурной вязкости; w и r – скорость и радиус сечения трубы, соответственно.

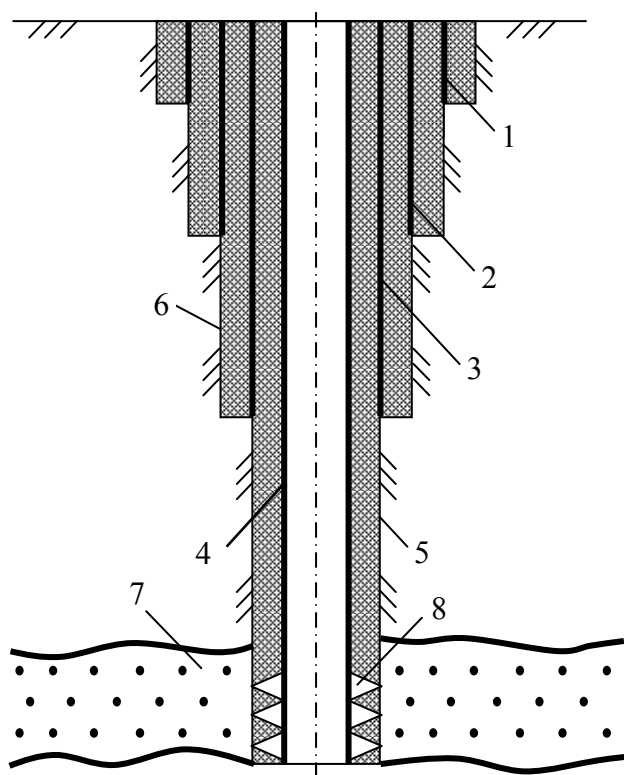


Рис. 9. Типовая конструкция буровой скважины (где 1 – направление; 2 – кондуктор; 3 – промежуточная колонна; 4 – стенки скважины; 5 – эксплуатационная колонна; 6 – цементный камень; 7 – пласт; 8 – перфорация в обсадной трубе и цементном камне)

При движении бурового раствора возможен как ламинарный, так и турбулентный режим течения. В случае турбулентного течения постановка задачи усложняется. Задача о течении должна решаться с использованием модели турбулентности, использующей понятие длины пути смешения l . В соответствии с этой моделью

$$\mu = \mu_0 \left(1 + l^2 \left| \frac{du}{dr} \right| \right). \quad (5)$$

Путь длины смешения определяется формулой:

$$l = R \left[0,14 - 0,08 \cdot \left(\frac{r}{R} \right)^2 - 0,06 \cdot \left(\frac{r}{R} \right)^4 \right], \quad (6)$$

где R – радиус трубы; r – координата по радиусу трубы.

Вид реологического закона (4) создает трудности при расчете гидродинамики неньютоновских жидкостей. Поэтому применен вариационный подход к решению данной задачи. Установившееся течение на продолжительных от-

резках бурильных труб и кольцевого пространства с постоянной площадью проходного сечения удовлетворяет безынерционному приближению Стокса:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \sigma + f &= 0; \\ \nabla \cdot V &= 0,\end{aligned}\tag{7}$$

где σ – тензор напряжений; f – заданная сила, определяемая градиентом давления. В соответствии с вариационным принципом решение дифференциального уравнения $L(v) = f$ (где L – положительно определенный оператор) эквивалентно нахождению минимума функционала

$$F(v) = (L(v), v) - 2(v, f),\tag{8}$$

где $(L(v), v)$ – внутреннее произведение.

Вместо уравнения (7) получим для течения в трубах следующую оптимизационную задачу:

$$\int_s \left[\frac{1}{2} \mu \left(\frac{du}{dr} \right)^2 + \tau_s \left| \frac{du}{dr} \right| - \nabla p \cdot u \right] ds \rightarrow \min ;\tag{9}$$

$$\int_s u ds = Q,\tag{10}$$

где s – область интегрирования (проходное сечение); Q – объемный расход жидкости; u – продольная скорость; p – давление.

Основная проблема при решении задачи (9, 10) заключается в том, что функционал (8) не дифференцируем в смысле Фреше в том случае, когда функция u тождественно равна постоянной в некоторой области $z \in S$. При заданном расходе бурового раствора градиент давления выступает в роли множителя Лагранжа. В случае $\mu = \mu_0 = const$ имеем ламинарный режим течения. При турбулентном режиме коэффициент вязкости зависит от параметров течения.

Для решения задачи (9) при заданном градиенте давления для преодоления трудности, связанной с не дифференцируемостью функционала, предложено применить генетический алгоритм. Для сведения вариационной задачи (9, 10) к задаче нелинейного программирования в области s введены разностная сетка $\{r_j, j = \overline{0, n}\}$ и сеточная функция $\{u_j, j = \overline{0, n}\}$. Производная скорости аппроксимируется конечно-разностной формулой

$$\frac{du}{dr} \approx \frac{u_j - u_{j-1}}{r_j - r_{j-1}},\tag{11}$$

а интегрирование (9, 10) проводится методом Симпсона. Далее решается задача оптимизации с неизвестными переменными u_j .

Выполнено сравнение профилей скоростей (ПС) при ламинарном и турбулентном движении в круглой трубе. Для ламинарного течения (ЛТ) полученный ПС согласуется с аналитическим решением, предложенным Лойцяньским Л.Г., а для турбулентного – приведено сравнение численно полученного профиля скорости из решения оптимизационной задачи и эмпирического.

Также для ЛТ выполнено сравнение аналитической и полученной численно зависимостей коэффициента сопротивления от параметра пластичности для круглой трубы (рис. 11).

На основе компьютерного моделирования получены характеристики гидродинамики в забое скважины при турбулентном течении (ТТ). Из вариационной постановки задачи рассчитаны характеристики течения для турбулентного режима. На основе оптимизации получена зависимость скорости от пластичности в круглой трубе и кольцевом пространстве для турбулентного движения (рис.12,13).

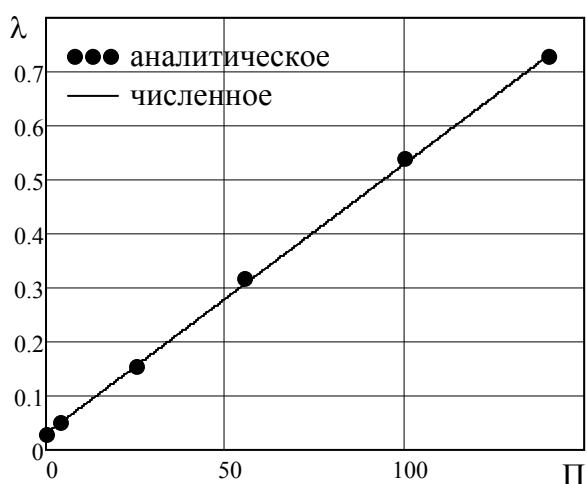


Рис. 11. Зависимости коэффициента сопротивления λ от параметра пластичности Π в круглой трубе

Проведены исследования для неизоэтермического осесимметричного течения бурового раствора в круглой трубе и кольцевом пространстве для турбулентного режима с использованием вариационного подхода решения задачи.

Скважина проходит через пласты породы с разной температурой, повышающейся с увеличением глубины бурения, что приводит к нагреву бурового раствора при течении в кольцевом зазоре и к изменению реологических характеристик μ и τ_s . Потери давления при подаче бурового раствора в скважину определяются этими реологическими характеристиками. При большой глубине бурения необходимо рассматривать процесс прогрева ствола скважины.

Скважина проходит через пласты породы с разной температурой, повышающейся с увеличением глубины бурения, что приводит к нагреву бурового раствора при течении в кольцевом зазоре и к изменению реологических характеристик μ и τ_s . Потери давления при подаче бурового раствора в скважину определяются этими реологическими характеристиками. При большой глубине бурения необходимо рассматривать процесс прогрева ствола скважины.

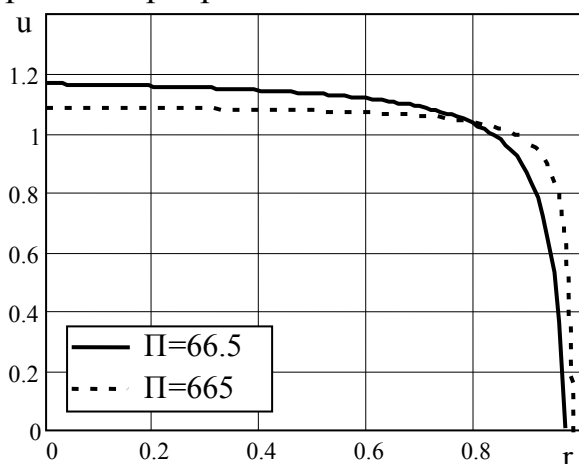


Рис. 12. Влияние параметра пластичности на распределение скорости в круглой трубе

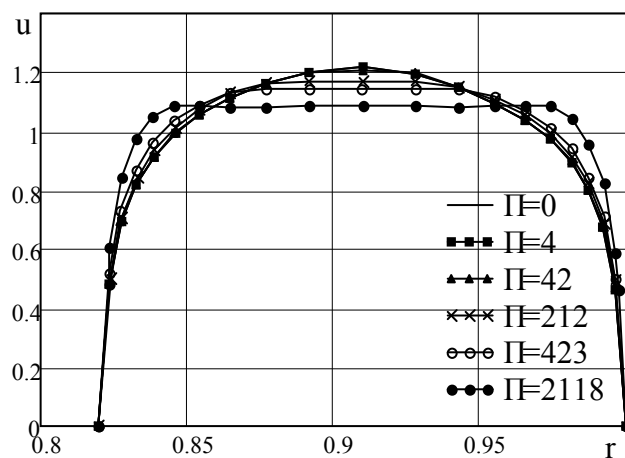


Рис. 13. Влияние параметра пластичности на распределение скорости в кольцевом пространстве

Осесимметричное уравнение переноса температуры можно записать в виде:

$$r\rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial t} + r\rho_s c_s u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial r} \left(r\lambda_s \varphi_l \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (12)$$

где ρ_s , c_s , λ_s – соответственно, плотность, коэффициенты теплоемкости и теплопроводности для раствора ($s = 1$), материала трубы ($s = 2$), окружающей породы ($s = 3$); x – координата, отсчитываемая вдоль оси скважины.

Температурные профили для трубы и кольцевого зазора показаны на

рис.14. Температура раствора в кольцевом зазоре повышается за счет нагрева от окружающей породы. Со временем температура снижается из-за охлаждения породы подаваемым в скважину раствором. Получена зависимость перепада давления от реологических свойств буровых растворов при распределении температуры по глубине нефтескважины при промывке (рис.15). Зависимость 1 соответствует перепаду давления в буровой трубе; 2 – кольцевому зазору.

В пятой главе обоснован критерий эффективности промывки скважины, в качестве которого предложено использовать максимальную очистку забоя скважины. Управление качеством бурения осуществляется посредством регулирования реологических характеристик бурового раствора. Чистота забоя скважины (а, следовательно, и процесс бурения) зависят от следующих факторов:

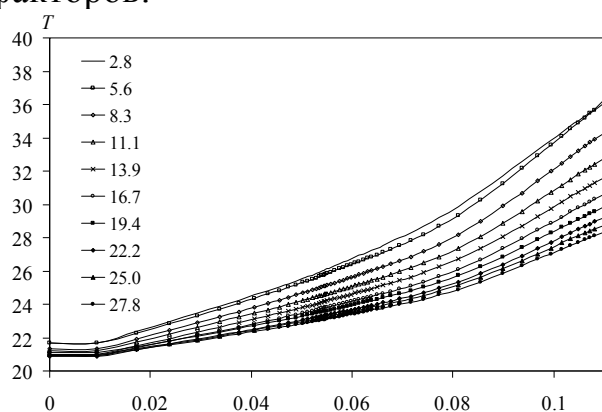


Рис. 14. Изменение профиля температуры в трубе и кольцевом зазоре

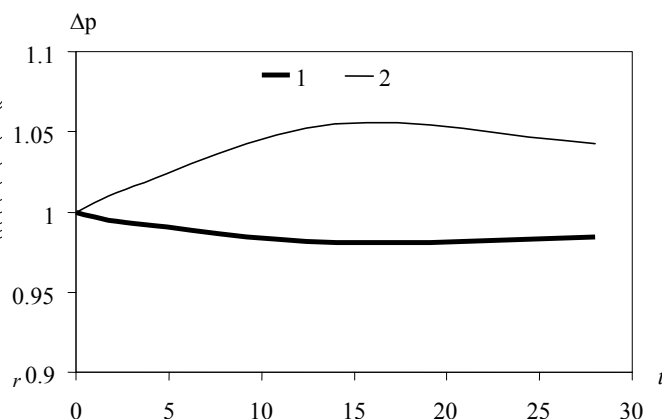


Рис. 15. Изменение перепада давления во времени

- качество бурового раствора (стабильность бурового раствора – первичный критерий его качества, оценка качества бурового раствора с точки зрения реологии производится на основании трех параметров: коэффициента пластичности, предела текучести и пластической вязкости);
- расход (количество) бурового раствора;
- скорость истечения жидкости из отверстий долота.

Предложено управлять качеством бурения с позиции максимальной очистки забоя посредством регулирования реологических характеристик бурового раствора. Для обеспечения чистоты забоя и полного извлечения породы необходимо выполнение условия:

$$f(x) = \omega(x) - u_p(x) \geq 0, \quad (13)$$

где $\omega(x)$ – средняя скорость движения раствора в сечении x ;

u_p – скорость подъема твердых частиц в этом сечении.

На основе математической модели неизотермического режима бурения сформулирована задача оптимального управления, обеспечивающая максимум уноса породы.

При заданных условиях и режиме бурения величины $\mu(T_0)$, $\tau_s(T_0)$ определяются из решения следующей задачи оптимального управления:

1. Целевой функционал

$$f_{\min}^2(\mu(T_0), \tau_s(T_0)) \rightarrow \min \quad (14)$$

2. Фазовые уравнения: (9, 10) и (12).

Поставленная задача оптимального управления, обеспечивающая максимум уноса породы, решается численно с применением генетического алгоритма оптимизации. В частности, для исходных данных: для скважины глубиной 2400 м при размерах трубы $R = 0,055$; $R_1 = 0,063$; $R_2 = 0,108$, а также для утяжеленной буровой трубы $R = 0,04$, $R_1 = 0,089$ изменение окружающей температуры ствола скважины задавалось уравнением $T_w(x) = T_0 + 0.025x$; $T_0 = 20$.

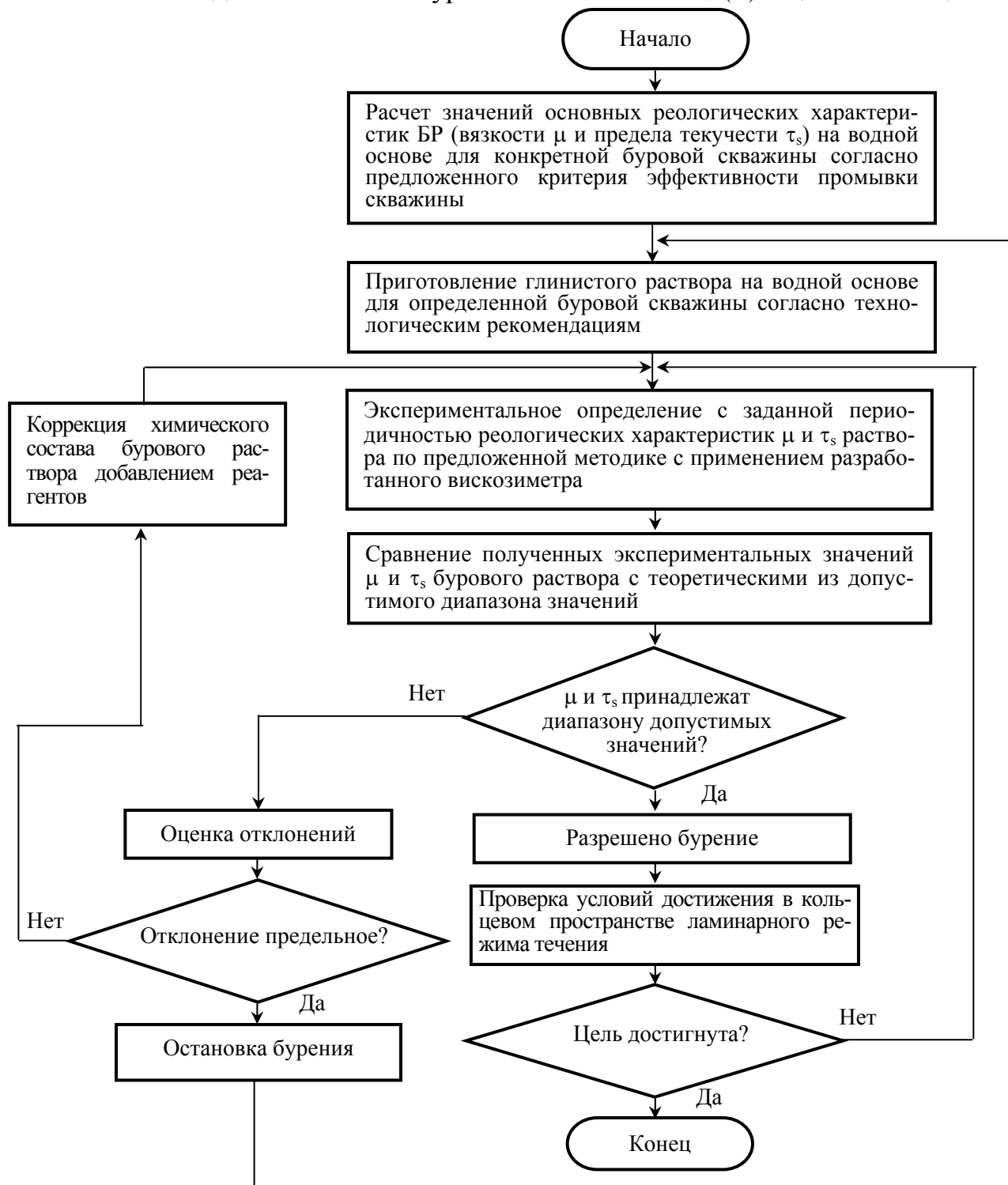


Рис.16. Алгоритм управления качеством бурения в процессе промывки скважины на основе контроля и регулирования параметров бурового раствора

Получены значения: $\mu(T_0) = 0.043 \pm 10\%$; $\tau_s(T_0) = 305 \pm 10\%$. При заданных режимах бурения и промывки ствола скважины решение задачи управления определяют значения реологических характеристик БР.

В данной главе также приведен предложенный алгоритм управления качеством бурения в процессе промывки скважины посредством контроля параметров БР (рис.16).

Таким образом, предложена комплексная методика определения реологических характеристик бурового раствора и устройство для ее реализации, которая заключается в определении типа жидкости исследуемого раствора и последующего одновременного вычисления величин его пластической вязкости и предельного напряжения сдвига. Следует отметить, что данная методика может применяться не только при исследовании, но и автоматическом контроле и регулировании реологических свойств буровых растворов на водной основе при установившейся скорости его циркуляции.

Заключение

В результате проведенных исследований разработаны и научно обоснованы математические и аппаратные средства контроля параметров буровых растворов в процессе управления их реологическими свойствами при строительстве скважины, что способствует повышению эффективности бурения за счет создания благоприятных условий для поддержания эффективности проходки путем создания новых перспективных условий работы для породоразрушающего инструмента.

Основные выводы и результаты:

1. Обзор и критический анализ работ, посвященных созданию и применению буровых растворов показал, что для оптимизации процесса промывки скважин при бурении целесообразно использовать системный подход, в основе которого лежит исследование объектов как систем.

2. Установлено, что основными параметрами, влияющими на качество промывки скважин при бурении являются реологические характеристики буровых растворов – вязкость и предел текучести.

3. Разработана экспериментальная методика установления типа бурового раствора как неньютоновской жидкости при установившемся течении (защищенная патентом РФ на изобретение), позволяющая по виду кривой течения определить тип неньютоновской жидкости.

4. Предложенная экспериментальная методика (защищенная патентом РФ на изобретение) для измерения реологических характеристик глинистого вязкопластического бурового раствора, обеспечивает одновременное определение вязкости и предела текучести (погрешность их нахождения составила $\sim 5\%$).

5. На основе разработанной конструкции вискозиметра (защищена патентом РФ на полезную модель) проведены экспериментальные исследования реологических свойств глинистых буровых растворов на водной основе при бурении с переменными температурами и давлением. Показано, что для обеспечения погрешности определения вязкости бурового раствора на уровне $\sim 5\%$ необходимо обеспечить следующие погрешности при изготовлении капилляров: для толщины кольцевого зазора не более $\sim 1,5\%$, для радиуса – $\sim 5\%$.

6. Проведенные эксперименты по исследованию вязкости и предела текучести бурового раствора на основе куганакского глинопорошка с добавлением реагентов при различных температурах и давлении показали, что в результате увеличения температуры с 23°C до 80°C вязкость и предел текучести уменьшается в ~ 3 раза.

7. На основе численного метода решения вариационной задачи проведены расчеты характеристик течения при турбулентном режиме, показавшие, что для кольцевой трубы при увеличении предельного напряжения до значений $\tau_s \approx 500$ Па коэффициенты сопротивления возрастают на порядок. Изменение перепада давления, связанное с неизотермичностью течения бурового раствора, составляет $\sim 5\%$.

8. На основе предложенного критерия качества бурения – максимальной очистки забоя скважины – сформулирована задача оптимального управления посредством регулирования реологических характеристик. Поставленная задача решена численно с применением генетического алгоритма оптимизации.

СПИСОК РАБОТ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ

1. Шелковникова Ю.Н. Гидродинамика глиносодержащего бурового раствора в нефтяных скважинах // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2013. – № 2 (58). – С. 156-159.
2. Тененев В.А., Шелковникова Ю.Н. Управление чистотой забоя скважины реологическими характеристиками бурового раствора при неизотермическом режиме бурения // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 2 (22). – С. 31-34.
3. Тененев В.А., Шелковникова Ю.Н. Неизотермический режим промывки ствола скважины при бурении // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 1 (21). – С. 53-55.
4. Покрас И.Б., Шелковникова Ю.Н. Применение буровых растворов для промывки скважин на месторождениях Удмуртии // Интеллектуальные системы в производстве. – 2012. – № 2 (20). – С. 50-53.
5. Покрас И.Б., Шелковникова Ю.Н. Вискозиметр для определения вязкости и напряжения сдвига при высоких температурах и давлениях // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2011. – № 4. – С. 17-19.
6. Покрас И.Б., Шелковникова Ю.Н. Течение вязкопластической смазки в предочаговой зоне при волочении в режиме жидкостного трения // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2001. – № 2. – С. 48-50.
7. Якимович Б.А., Шелковникова Ю.Н. Методы и средства измерения реологических характеристик буровых растворов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2016. – № 1. – С.63-68.

Патенты РФ

8. Патент на изобретение № 2244286 (Россия), МПК G 01 N 11/08 / Способ определения реологических характеристик вязкопластических жидкостей / И.Б. Покрас, Ю.Н. Шелковникова. Заявл. 06.11.2003. – № 2003132600/28 (Россия); Опубл. – 10.01.2005. – Бюл.№ 1.

9. Патент на полезную модель № 75745 (Россия), МПК G 01 N 11/00 / Капиллярный вискозиметр / И.Б. Покрас, Г.А. Чикуров, Ю.Н. Шелковникова. Заявл. 04.04.2008. – № 2008113142/22 (Россия); Оpubл. – 20.08.2008. – Бюл.№ 23.
10. Патент на изобретение № 2434221 (Россия), МПК G 01 N 11/08 / Способ определения реологических характеристик неньютоновских жидкостей / И.Б. Покрас, Г.А. Чикуров, Ю.Н. Шелковникова. Заявл. 04.05.2010. – № 2010117822/28 (Россия); Оpubл. – 20.11.2011. – Бюл.№ 32.

В других изданиях

11. Покрас И.Б., Шелковникова Ю.Н. Методика измерения вязкости и предела текучести вязкопластических жидкостей // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2006. – Т. 72. – № 10. – С. 30-33.
12. Покрас И.Б., Шелковникова Ю.Н., Чикуров Г.А. Математическая модель процесса волочения в режиме жидкостного трения // Тезисы докладов пятой оссийской университетско-академической научно-практической конференции. Ч.9 – Ижевск. Изд-во УдГУ. – 2001. – С.47-48.
13. Шелковникова Ю.Н. Особенности контроля реологических параметров буровых растворов при переменных температурах и давлении // Материалы НТК «Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства». – Ижевск: ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2016. – С.254-258.
14. Шелковникова Ю.Н. Исследование метрологических характеристик вискозиметра для определения реологических параметров буровых растворов // Ползуновский альманах. – 2016. – №2. – С.46-48.
15. Шелковникова Ю.Н. Повышение качества очистки скважины посредством регулирования реологических характеристик и скорости бурового раствора // Ползуновский альманах. – 2018. – №3. – С.38-42.
16. Тененев В.А., Шелковникова Ю.Н. Применение системного подхода для оптимизации процесса промывки буровых скважин // Ползуновский альманах. – 2019. – №4. – С.117-120.
17. Шелковникова Ю.Н. Управление процессом промывки скважины посредством контроля параметров бурового раствора // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании: сб. тр. Всерос. науч.-техн. конф. – Ижевск: ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2020. – С.235-241.